

Title	Topological solitons and non-perturbative phenomena in field theory
Sub Title	
Author	Chatterjee, Chandrasekhar
Publisher	
Publication year	2025
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2024.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究課題では、トポロジカル欠陥と相転移の新たな構造が明らかにされた。第1論文では、AB位相を受ける場の自発的対称性の破れにより形成される「AB欠陥」を提案し、その普遍性を示した。第2論文では、中性子星内の3P2超流動の表面におけるブージャムと秩序パラメータの対称性変化を解明した。第3論文では、修正XY模型の場の再正規化によりBKTとIsing型の2段階相転移が確認された。第4論文では、ジョセフソン項付きアーベル・ヒッグス模型で、局所・大域ボルテックスの分類と磁束構造を明らかにした。 This research subject examines topological defects and phase transitions in field theory and condensed matter systems. The first introduces "AB defects," formed when a field with an Aharonov-Bohm (AB) phase acquires a vacuum expectation value, producing confined or global strings and breaking spatial symmetries depending on interactions. The second studies neutron 3P2 superfluids in neutron stars, showing surface phenomena such as symmetry changes, anisotropic energy distributions, and boojum-like topological defects. The third analyzes a modified XY model and its continuum counterpart, revealing a two-step BKT and Ising-type phase transition via functional renormalization group methods and simulations. The fourth explores a generalized Abelian-Higgs model with Josephson-like couplings, finding fractional magnetic flux in local vortices and classifying vortex networks. Together, these works deepen understanding of defect formation and rich phase behavior in diverse physical contexts.
Notes	研究種目：若手研究 研究期間：2019～2024 課題番号：19K14713 研究分野：場の量子論、素粒子論
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_19K14713seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

令和 7 年 6 月 17 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2024

課題番号：19K14713

研究課題名（和文）Topological Solitons and Non-perturbative Phenomena in Field Theory

研究課題名（英文）Topological Solitons and Non-perturbative Phenomena in Field Theory

研究代表者

チャッタージー チャンドラセカル（CHATTERJEE, Chandrasekhar）

慶應義塾大学・自然科学研究教育センター（日吉）・訪問研究員

研究者番号：40837837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、トポロジカル欠陥と相転移の新たな構造が明らかにされた。第1論文では、AB位相を受ける場の自発的対称性の破れにより形成される「AB欠陥」を提案し、その普遍性を示した。第2論文では、中性子星内の3P2超流動の表面におけるブージャムと秩序パラメータの対称性変化を解明した。第3論文では、修正XY模型の場の再正規化によりBKTとIsing型の2段階相転移が確認された。第4論文では、ジョセフソン項付きアーベル・ヒッグス模型で、局所・大域ボルテックスの分類と磁束構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、トポロジカル欠陥の分類、相互作用の理論を拡張し、特にAB位相や場の対称性の破れが新たな欠陥構造や相転移を生み出す機構を明確化した点で学術的に大きな意義を持つ。中性子星内部における3P2超流動の表面構造解析や、BKT・Ising型の複合的相転移の解明、ジョセフソン項を含むアーベル・ヒッグス模型における磁束構造と欠陥ネットワークの分類など、場の理論・宇宙物理・物性物理の広範な分野における共通基盤を提供している。これらは、中性子星内部構造の解明、トポロジカル量子計算への応用、量子デバイス設計や高温超伝導材料開発など、今後の科学技術に対しても多大な波及効果をもたらすことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research subject examines topological defects and phase transitions in field theory and condensed matter systems. The first introduces “AB defects,” formed when a field with an Aharonov-Bohm (AB) phase acquires a vacuum expectation value, producing confined or global strings and breaking spatial symmetries depending on interactions. The second studies neutron 3P2 superfluids in neutron stars, showing surface phenomena such as symmetry changes, anisotropic energy distributions, and boojum-like topological defects. The third analyzes a modified XY model and its continuum counterpart, revealing a two-step BKT and Ising-type phase transition via functional renormalization group methods and simulations. The fourth explores a generalized Abelian-Higgs model with Josephson-like couplings, finding fractional magnetic flux in local vortices and classifying vortex networks. Together, these works deepen understanding of defect formation and rich phase behavior in diverse physical contexts.

研究分野：場の量子論、素粒子論

キーワード：Topological Defects Aharonov-Bohm Effect Aliceストリング（Alice String） 3P2 Superfluidity Boojum BKT Transition Abelian-Higgs Model Josephson Coupling

※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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

Topological defects and phase transitions have long played a central role in the study of both high-energy and condensed matter physics. These phenomena are responsible for diverse and fundamental processes, such as the formation of cosmic strings during symmetry-breaking transitions in the early universe and the dynamics of vortices in type-II superconductors and superfluid systems. The interplay between topological configurations and underlying symmetry structures often dictates the physical properties and evolution of complex systems.

In recent years, significant theoretical and experimental advances have broadened our understanding of exotic defect structures, including non-Abelian vortices, Alice strings, and boojums. These developments have furthered the exploration of unconventional confinement mechanisms and have uncovered intricate multi-scale phase transition behaviors that defy the standard Landau paradigm. Such phenomena arise in systems ranging from quark-gluon plasmas and neutron stars to ultracold atomic gases and engineered quantum materials.

This study builds upon this foundation by investigating novel field-theoretical frameworks that support rich defect structures and nontrivial phase behaviors. By doing so, it aims to shed light on universal aspects of symmetry breaking, duality, and emergent gauge phenomena. Importantly, the analysis is grounded in physical systems that are either directly observable or experimentally realizable, such as neutron star matter, spin systems, and condensed matter analogs, thereby ensuring the practical relevance of the theoretical models.

2. 研究の目的

The overarching goal of this research is to identify and classify new mechanisms of topological defect formation, interaction, and confinement in a range of quantum field and condensed matter systems. Specifically, the study seeks to:

- Elucidate how Aharonov-Bohm (AB) phase structures influence vacuum expectation values and generate novel defect types, including AB-induced global strings and domain wall-confined strings.
- Analyze surface-induced topology and defect localization in superfluid phases, with special focus on the behavior of neutron ${}^3\text{P}_2$ - ${}^3\text{P}_2$ superfluids under strong magnetic fields.
- Investigate multi-step and dual phase transition mechanisms in modified XY and Goldstone-type models using renormalization group approaches, aiming to map the interplay between continuous and discrete symmetry breaking.
- Classify and understand fractional flux vortices and angular domain walls within generalized Abelian-Higgs models involving multiple charged scalar fields and Josephson-type couplings.

By connecting these theoretical insights with experimentally relevant systems, the project aims to bridge fundamental physics and observable phenomena, ultimately contributing to a deeper understanding of topological phases of matter.

3. 研究の方法

To address the outlined objectives, the study employs a wide array of analytical and numerical techniques customized for each system of interest:

- Gauge Theory & Alice Strings: A $U(1)\times SU(2)$ gauge theory is developed to study defects associated with AB phases and Alice strings. These configurations are analyzed to understand transitions between global strings and domain wall-confined structures, which can spontaneously break spatial symmetries.
- Ginzburg-Landau Theory in Superfluids: Surface effects in neutron

superfluids, particularly those exhibiting 3P2 pairing, are modeled using Ginzburg–Landau-type equations under external magnetic fields. Numerical simulations are performed to resolve anisotropic surface energy distributions and identify topological excitations such as boojums.

- Functional Renormalization Group (FRG): Modified XY and Goldstone models are studied via FRG methods to track the flow of coupling constants and correlation functions across energy scales. This approach enables the identification of two-step transition sequences, including BKT and Ising-like behaviors, within a unified framework.
- Abelian-Higgs Model with Two Scalars: A generalized Abelian-Higgs model with two complex scalar fields and Josephson couplings is solved both analytically and numerically. The focus is on classifying vortex solutions with fractional magnetic flux and on deriving angular domain wall solutions embedded in global vortices.

These methodological approaches are chosen to be mutually complementary, enabling a comprehensive investigation of both microscopic configurations and macroscopic phase behavior across multiple physical systems.

4. 研究成果

Across four key papers, this research uncovers a rich variety of topological defects and novel phase behaviors that arise from the interplay of gauge fields, surface effects, and multi-component field dynamics.

- Paper 1: AB Defects and Alice Strings
Introduces the concept of an “AB defect,” which appears when a field subject to an Aharonov-Bohm phase acquires a nonzero vacuum expectation value. Utilizing a $U(1) \times SU(2)$ gauge theory framework with Alice strings, it is shown that these defects can interpolate between global string configurations and strings confined by domain walls. The system exhibits spontaneous spatial symmetry breaking and rich topological structures.
- Paper 2: Surface Phenomena in Neutron Superfluids
Focuses on neutron 3P2 superfluid phases under magnetic fields, revealing surface-localized topological excitations known as boojums. The study also uncovers anisotropic surface energy distributions and surface-induced symmetry breaking, which could influence the macroscopic behavior of neutron stars, including their rotational dynamics and magnetic field evolution.
- Paper 3: Dual Transitions in Modified XY Models
Applies FRG techniques to a modified XY model and its continuum version, a Goldstone-type model with additional interactions. The analysis demonstrates the existence of two distinct phase transitions: a BKT transition associated with vortex unbinding and an Ising-type transition corresponding to discrete symmetry breaking. These results provide a unified picture of dual-phase transitions in low-dimensional systems.
- Paper 4: Fractional Flux Vortices and Domain Walls
Investigates a generalized Abelian-Higgs model with two charged scalar fields and Josephson couplings. It classifies vortex solutions with fractional magnetic flux and derives exact solutions for angular domain walls embedded in global vortices. The model provides a theoretical foundation for understanding composite topological excitations in multi-component superconductors and superfluids.

Together, these studies significantly deepen our understanding of how topological defects emerge, evolve, and influence phase behavior in complex quantum systems. The insights gained are not only theoretically compelling but also experimentally relevant, offering potential applications in condensed matter physics, astrophysics, and future quantum technologies.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Chatterjee Chandrasekhar, Nitta Muneto	4. 巻 101
2. 論文標題 Aharonov-Bohm defects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 085002-1, 15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.101.085002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

1. 著者名 Chatterjee Chandrasekhar, Gudnason Sven Bjarke, Nitta Muneto	4. 巻 2020
2. 論文標題 Chemical bonds of two vortex species with a generalized Josephson term and arbitrary charges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 0, 36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP04(2020)109	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi Michikazu, Fejos Gergely, Chatterjee Chandrasekhar, Nitta Muneto	4. 巻 2
2. 論文標題 Vortex confinement transitions in the modified Goldstone model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013081, 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.013081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yasui Shigehiro, Chatterjee Chandrasekhar, Nitta Muneto	4. 巻 101
2. 論文標題 Topological defects at the boundary of neutron 3P2 superfluids in neutron stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 025204, 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.101.025204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Yasui Shigehiro, Chatterjee Chandrasekhar, Kobayashi Michikazu, Nitta Muneto	4. 巻 100
2. 論文標題 Reexamining Ginzburg-Landau theory for neutron 3P2 superfluidity in neutron stars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 025204, 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.025204	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Yasui Shigehiro, Chatterjee Chandrasekhar, Nitta Muneto	4. 巻 26
2. 論文標題 Effects of Strong Magnetic Fields on Neutron 3P2 Superfluidity with Spin-Orbit Interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 024022, 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

1. 著者名 Chatterjee Chandrasekhar, Nitta Muneto, Yasui Shigehiro	4. 巻 26
2. 論文標題 Quark-Hadron Crossover with Vortices	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 024030, 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新田宗土, Chandrasekhar Chatterjee
2. 発表標題 Aharonov-Bohm defects
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------