The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	QCD Matter in a Holographic Model
Author(s)	岩中, 章紘
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101911
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　岩中　章紘　　）	
論文題名	QCD Matter in a Holographic Model （ホログラフィック模型による有限密度QCDの記述）

論文内容の要旨

量子色力学（QCD）の有限密度領域の性質，特に低密度のハドロン相と超高密度のカラー超伝導相の中間的な密度で物質が呈する様相はほとんど未解明である．その原因に強結合性と符号問題が挙げられる．前者のために摂動的QCDが，後者のために格子QCD計算による数値シミュレーションがそれぞれ適用できない．こうした困難から，ハドロン有効模型によるアプローチが有限密度QCD研究の有用な手段となっている．

本論文ではハドロン有効模型の一種であるホログラフィックQCD模型を用いて有限密度QCDを研究した．ホログラフィックQCD模型は4次元のQCDを5次元の重力理論として記述するハドロン有効模型である．この模型は有限密度状態を扱え，強結合性を反映した計算が可能である．またカラーの閉じ込め/非閉じ込め転移とカイラル相転移の両方を含む．さらにメソンとバリオンを5次元の場として統一的に記述する．こうした特徴からホログラフィックQCD模型は有限密度QCD研究に適している．

本論文では代表的なホログラフィックQCD模型であるhard-wall模型を用いてゼロ温度・有限密度のQCD調べる方法を新たに提案した．その際homogeneous Ansatzと呼ばれるAnsatzを用いた．しかし系の外場を正しく取り扱うと，従来用いられている手法ではバリオン数密度が有限な状態を記述できない．そこで本論文ではIR境界条件と呼ばれる境界条件を切り替えることでバリオン数密度の相転移を記述する新たな手法を提案した．系のグランドポテンシャル密度の比較とGubser-Klebanov-Polyakov-Witten処方と呼ばれるホログラフィックQCDの手法を用いて境界条件を決定し，5次元時空の場の配位を運動方程式から求め，実際に本手法を用いて有限密度QCD物質を記述した．さらに相転移バリオン化学ポテンシャルや相転移密度，状態方程式といった物質を特徴付ける物理量を求め，この物質の性質を研究した．その結果，バリオン数密度の相転移とカイラル相転移が一次相転移として同時に起こることなどが明らかとなった．また実現した物質に対して，高密度の閉じ込められたQCD物質という物理的解釈を与えた．

得られた結果から，homogeneous Ansatzでは記述できない，比較的低密度な相がホログラフィックQCD模型で実現する可能性を新たに提案した．これまでに別の有効模型の解析から非一様相の出現が低密度領域において示唆されており，この相がhomogeneous Ansatzで記述できない相に該当する可能性が考えられる．このように他の有効模型の結果と本研究の結果を複合的に照らし合わせながら，有限密度QCDの性質に迫ることができる．

また本研究で与えたホログラフィックな有限密度計算の枠組みは，有限のクォーク質量に対するものである．ゆえに従来のホログラフィック模型では不可能だった，ストレンジクォークの質量を考慮した，有限密度系のフレーバー対称性の拡張が可能である．ストレンジクォークの影響を考慮すると理論計算が中性子星の観測結果を再現できなくなる問題が有限密度QCDで知られており，ハイペロンパズルと呼ばれる．本研究はハイペロンパズル解決へ向けた基礎的研究としての位置付けを有する．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　岩中　章紘　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	保坂　淳
	副 査	教授	浅川　正之
	副 査	教授	野海　博之
	副 査	准教授	吉田　賢市
	副 査	准教授	石井　理修

論文審査の結果の要旨

量子色力学（QCD）に支配される物質の相構造は、とりわけ中性子星の内部で実現されていると予想される、核物質密度の数倍の密度領域において未解明である。その原因に QCD の強結合性と符号問題が挙げられ、これらは摂動理論や格子 QCD の方法で扱うことができない。そこでこの領域の研究には、ハドロン有効模型によるアプローチが有用な手段となっている。

本論文で岩中君は、ハドロン有効模型のひとつであるホログラフィック QCD 模型を用いた研究を行った。この模型は 4 次元時空の QCD を余剰 1 次元を加えた 5 次元の重力理論として記述する。この模型によって、有限密度状態で強結合性を反映した計算が可能になる。またメソンとバリオンを統一的に記述する。この模型は QCD の非自明な性質を効率よく取り込む手法として近年脚光を浴びている。

本研究で岩中君は、代表的なホログラフィック QCD 模型である hard-wall 模型を用いてゼロ温度・有限密度の QCD 物質の研究を行った。問題設定と手法を定式化するにあたって、先行研究の論文を精査するなかで問題点を発見し、それらを改善し模型の予言を正しく導くことに専念した。

まず系の性質を決めるラグランジアン構築にあたり、低密度領域から高密度領域に拡張することを念頭に、閉じ込め相に対応する計量を採用し時空を構成した。次にメソンとバリオンを統一的に扱えるフレーバーゲージ場と、カイラル凝縮に対応するスカラー場によって物質場を構成した。物質場の配位としては我々が住む 4 次元時空で均一なものを仮定し、また、ゲージ場の空間成分がアイソスピン成分と連結した hedgehog と呼ばれる Ansatz を仮定した。こうすることで、5 次元空間の問題が余剰次元の変数 z のみに依存する非線形な連立微分方程式に帰着する。次に先行研究からの改善点として、まず、化学ポテンシャルとバリオン数のあいだを正しく関係づけるための場の配位を適切に決めた。さらに本研究の核心として、微分方程式の境界条件の一つである IR 境界条件を工夫した。その結果異なる境界条件下での微分方程式の解によって得られるグランドポテンシャルを比較することで、より安定な解を得ることができた。一般にこのような微分方程式を解くことは容易でなく、およそ 1 年に及ぶ試行錯誤の結果、物理的に意味のある解を見出すことに成功した。そしてこの模型が予言する有限密度物質の性質を議論した。

その結果は、まず、現在観測されている中性子星の基本的な性質、すなわち半径と質量の上限値を再現することがわかった。従って、この模型が予言する物質が中性子星の内部に存在する可能性を示唆した。一方でいくつかの性質は予期せぬものだった。(1) この模型が予言するバリオン物質の密度は少なくとも原子核密度の数倍程度以上であること。(2) 音速が光速に近いこと。(3) カイラル凝縮が抑制されていること。これらの性質を持ち合わせる物質は従来予想されていなかったもので、その存在が今後の理論研究や観測で確認できれば、QCD 物質の新たな理解につながることが期待できる。

以上、本研究は岩中君独自の発想と問題解決力によって達成したこと、先行研究の問題点を改善し正しく模型の解を得たこと、新たな物質形態の可能性を示唆したことにおいてユニークな成果となった。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。