（ 続紙 1 ）

京都大学	博 士（ 理 学 ）	氏名	堀　敬一朗
論文題目	ホログラフィックQCDにおけるバリオンとそのdilatationモードの研究		

（論文内容の要旨）

論文では、強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）の低エネルギーでの強結合領域を研究対象として、ホログラフィックQCDを用いて、バリオンおよびバリオンのディラテーション励起モードの研究を行った。ホログラフィックQCDは、超弦理論のDブレーンから出発し、ゲージ重力双対を用いて、高次元重力理論で記述された非摂動的QCDの有効理論である。ここで現れるゲージ理論と重力理論は、ある条件下では、一方の強結合領域が他方の弱結合領域に対応するので、QCDの強結合領域における非摂動的性質を古典的な高次元重力理論の解析によって調べることができる。このような理論的枠組はホログラフィックQCDと称され、特に、酒井・杉本モデルは、クォークのカレント質量がゼロの massless QCDに対応しており、多くのハドロン間の結合定数や現象論的な法則の再現などに成功している。酒井・杉本モデルにおける有効理論の主要項は、非自明な背景重力を持つ 1+4 次元のフレーバー空間におけるゲージ理論であり、ゲージ場を余剰次元方向に関してモード展開すると系統的にメソン場が現れ、バリオンはメソン場のソリトンとして記述される。

論文では、ホログラフィックQCDとして、この酒井・杉本モデルを用いたバリオンの数値的な解析を行っている。ホログラフィックQCDで現れる重力側の有効理論は、1+4 次元という「高次元の非可換なゲージ理論」であり、高次元性と非可換性から古典レベルでも解析が難しい。この困難を回避するため、論文では Witten Ansatz を用いている。この方法は 回転対称なバリオンのソリトン配位に対して適用可能であり、Witten Ansatz をホログラフィックQCDに適用すると、「1+4 次元の非可換ゲージ理論」は、「1+2 次元の Abelian-Higgs 理論」に還元される。また、この変換に伴って、理論が担うトポロジーは、4次元空間のインスタントンから、2次元空間のボルテックスに写される。還元された「低次元の可換な理論」は、取り扱いが比較的容易であり、そこでのボルテックスを数値的に解析することでバリオンの直接的な計算が可能になる。論文では、この様な方法により、ホログラフィックQCDでの基底状態のバリオンについて数値的に計算し、質量や大きさ、分布関数などの物理量を求めた。数値計算の際には、細かい間隔で大きなサイズの格子を用いて、背景重力への近似なしに、精度の良い計算を実行している。

次いで、Witten Ansatz により対応付けられたインスタントンとボルテックスの間の関係性に着目し、ホログラフィックQCDでのバリオンの質量とサイズの関係を調べた。Witten Ansatz を用いた場合、バリオン・サイズである「インスタントン

のサイズ」は、「ボルテックスを構成するヒッグス場の零点の位置」に対応している。論文では、この関係を利用して、バリオン質量に対するバリオン・サイズ依存性を調べ、更に、バリオン・サイズが時間に依存して振動するディラテーション・モードというバリオン励起を考え、ホログラフィックQCDにおいて、その励起エネルギーを数値的に評価し、577MeV という結果を得た。ディラテーション励起はスピンやフレーバーなどの量子数を変えないことから、論文では、核子に対するディラテーション励起は、ローパー共鳴状態 $N^*(1440)$ であると予測し、また、バリオンの各チャンネルに対して、ディラテーション励起は普遍的に存在し、同程度の励起エネルギーの状態として実験的に現れると予想した。

（続紙　２　）

（論文審査の結果の要旨）

強い相互作用の基礎理論である量子色力学（QCD）は、非可換ゲージ理論に特徴的な漸近的自由性のために、系のエネルギー・スケールに依存して相互作用の強さが大きく変化し、それに伴って多彩な物理の様相を示す。特に、クォークとグルーオンが非常に強結合な系となる低エネルギー領域では、カラーの閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れ、非自明なトポロジーの顕在化など、真空自身の構造が 摂動的な場合と比べて劇的に変化し、物理的にも多彩で興味深いが、その反面、理論的解析は現在でも非常に難しい課題である。

論文では、超弦理論でのDブレーンを用いてQCDの非摂動的解析を行うホログラフィックQCDにより、バリオンの諸性質とそのディラテーション励起に関する理論的解析を行っている。ホログラフィックQCDで現れる重力側の有効理論は、「高次元性」と「非可換性」から古典レベルでも解析が難しいが、論文では、この困難を、Witten Ansatz を用いて巧みに回避している。実際、Witten Ansatz をホログラフィックQCDに適用すると、「1+4 次元の非可換ゲージ理論」は、「1+2 次元の Abelian-Higgs 理論」に還元され、解析が比較的容易な「低次元の可換な理論」になる。

論文では、この様な戦略により、ホログラフィックQCDでの基底状態のバリオンを、数値的に計算し、質量や大きさ、分布関数などの物理量を求めている。数値計算の際には、先行の多くの研究で為された背景重力場への近似など無しで、また、0.04fm という非常に細かいメッシュで、10fm という非常に大きなサイズの格子を用いて精度の良い計算を行っている。

論文の後半では、Witten Ansatz で対応付けられたインスタントンとボルテックスの間の関係性に着目し、バリオン質量に対するバリオン・サイズ依存性を調べた。次いで、バリオン・サイズが時間に依存して振動するディラテーション・モードという特徴的なバリオン励起を考え、ホログラフィックQCDにおいて、その励起エネルギーが 577MeV 程度という結果を導き、核子に対するディラテーション励起は、ローパー共鳴状態 $N^*(1440)$ であると予測した。また、バリオンの各チャンネルに対して、ディラテーション励起は普遍的に存在し、同程度の励起エネルギーの状態として実験的に現れると予想している。

論文のディラテーション励起の結果に対する学術的な位置づけを述べておく。近年、QCDに基づくバリオンの性質を調べる方法として、格子QCDがよく用いられているが、実は ローパー共鳴は格子QCDでは調べることが難しいことが知られている。論文では、この問題に対して、ホログラフィックQCDを用いてアプローチし、定量的な結果を得たとも言える。実際の解析を行う上での技術的工夫として、４次元空間のインスタントンを２次元空間のボルテックスに変換することで、精度の高い計算を可能にしたこともこの論文の重要な点である。

この様に 本論文は、ホログラフィックQCDという解析的なアプローチを、理論的に解き易く還元し、数値計算も実行し、ハドロン物理学において重要なバリ

オンの諸性質とディラテーション励起に対して、有意な結果と理論的予測を導いている。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和６年５月２０日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：　　年　　月　　日以降