



Title	Lattice study of color confinement mechanism in Coulomb gauge QCD
Author(s)	中川, 義之
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/49713
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。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

【38】

氏 名	なか がわ よし ゆき 中 川 義 之
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第 2 2 6 7 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 21 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学 位 論 文 名	Lattice study of color confinement mechanism in Coulomb gauge QCD (格子 QCD シミュレーションを用いたクーロンゲージ量子色力学における閉じ込め機構の研究)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 土 岐 博 (副査) 教 授 浅 川 正 之 教 授 岸 本 忠 史 教 授 窪 田 高 弘 准教授 保 坂 淳

論文内容の要旨

1960年代以降、様々な物質の構成要素である陽子や中性子は、クォークと呼ばれる基本的な粒子からできていると考えられている。しかしクォークやその間に働く強い力を媒介するグルーオンが単独で観測されたことは今まで一度もない。この現象はカラー閉じ込めと呼ばれ、現代数理論物理学が解明すべき大問題の一つとなっている。クォークやグルーオンは、存在しなければ様々な実験結果を説明することができないが、それ自身を直接観測することはできないという極めて特異な存在である。本研究の目的は 格子QCD計算を用いてクーロンゲージにおける閉じ込め機構を明らかにすることにある。

クーロンゲージにおける閉じ込め機構はGribovによって提唱され、Zwanzigerによってその研究が押し進められた。クーロンゲージは正定値計量をもつ物理的なゲージであり、ハミルトニアン形式では非物理的な自由度が現れない。またクーロンゲージでのハミルトニアンは瞬間相互作用を含み、クォーク間の相互作用は横波成分のグルーオン交換と瞬間相互作用が担うことになる。Gribov-ZwanzigerシナリオではGribov地平線近傍のゲージ配

位が経路積分を支配し、赤外領域の物理を支配すると考えられている。その結果、Faddeev-Popovゴーストの固有値密度はゼロ固有値近傍で増大し、瞬間相互作用が閉じ込め力をもたらすと期待される。一方、横波成分のグルーオンはハドロン内部に閉じ込められているため、横波グルーオン伝搬関数は赤外極限で抑制されることが予想される。本研究ではこれらの物理量を格子QCDシミュレーションで計算した。

カラークーロンポテンシャルはクォーク間の距離とともに線形上昇し、静的ポテンシャルよりも強くなることが明らかになった。連続極限でのカラークーロンポテンシャルの弦張力を見積もると、およそ1.3[GeV]となった。これは現象論的に知られている静的ポテンシャルの弦張力の3倍ほど大きい。この結果から、クーロンゲージでは瞬間相互作用が極めて大きな閉じ込め力をもたらすことがわかる。

ゴースト演算子の固有値密度はゼロ固有値近傍で増大することが確かめられた。また格子の体積を大きくするにつれ、ゴースト演算子の最小固有値はラプラス演算子のそれよりずっと早くゼロに近づくことを示した。さらにゴースト伝搬関数は赤外極限で単純極よりも強く発散することがわかった。これらの結果はGribov-Zwanzigerシナリオを強く指示するものである。

横波グルーオンの伝搬関数は運動量が小さくなるにつれて増大していき、およそ500[MeV]を境にして減少に転じることが明らかになった。これは赤外極限で発散するゼロ質量粒子の伝搬関数や、ゼロ運動量近傍で一定値に近づく有限質量粒子の伝搬関数の振る舞いと決定的に異なる。赤外領域で伝搬関数を冪関数でフィットすると、ゼロ運動量で伝搬関数がゼロになることが示された。これは横波グルーオンが赤外極限で無限の有効質量をもっているとなすことができ、グルーオンの閉じ込めを示唆する結果である。

論文審査の結果の要旨

量子色力学 (QCD) の構成粒子であるクォークやグルオンは閉じ込められていて単独な粒子としては観測されない。ウイルソンループの計算からQCDはこの閉じ込めの性質を持っていることは分かっているが、どのような機構でおきているのかは定かにはなっていない。さらには閉じ込めの機構を明らかにすることで、非摂動的現象を解析的に表現する方法を見いだすことも重要な課題となっている。

中川君はこの閉じ込めの問題に対して、最近注目されているクーロンゲージでのSU(3)の格子理論計算を行うことで、QCDの持っている性質の研究を行った。クーロンゲージではクォーク間に瞬間相互作用が現れること、グルオンの自由度は横波の成分だけになり物理的な粒子だけが現れることが特徴である。さらには、クーロンゲージにおけるグリボフ仮説を数値計算によって検証することも重要な研究課題である。

量子場の格子理論ではゲージ固定の際にいくつもの同じゲージ条件を満たす配位が現れるというグリボフコピの問題がある。これらの複数の配位からトリビアルな配位を含むゲージ配位を選択する必要があるが、中川君は詳細な数値計算を行うことで複数の配位を確認し、最適なゲージでの数値計算を行うことに成功した。その上で瞬間相互作用の計算を行い、その成分は非常に大きな閉じ込めの性質を持つことを示した。さらには高温の非閉じ込め相での計算でも瞬間相互作用は同じように閉じ込めの性質を保持することを示し、グリボフの仮説の有用性を示した。グルオンの閉じ込めに対しては、横波成分のプロパゲーターを大きな格子空間で計算し運動量依存性を調べた。運動量が減少するにつれて、プロパゲーターが単調に増加するのではなく、極大値を持ち減少に転じることを示した。これは良く採用されるローレンツゲージではその性質を見ることができず、クーロンゲージでは閉じ込めの物理を端的に表現できることを意味している。

中川君は詳細な格子量子色力学の数値計算を敢行し、世界に先駆けてクーロンゲージでの閉じ込めの性質を調べることで、閉じ込めの物理の理解を進める上で大きな貢献をしたと言える。

以上のことから、博士 (理学) の学位論文として十分価値のあるものと認める。