

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	大畑 宏樹
論文題目	Monte Carlo study of Schwinger model at finite temperature and theta (モンテカルロ法によるシュウィンガー模型の有限温度 有限シータ領域の解析)		
(論文内容の要旨)			
<p>自然界の4つの相互作用のうち、強い相互作用・弱い相互作用・電磁相互作用は素粒子標準模型によって記述される。素粒子標準模型は <math>SU(3) \times SU(2) \times U(1)</math> ゲージ対称性を持つ理論であり、作用が局所ゲージ対称性を持つという指導原理 (ゲージ原理) が相互作用の形に強い制限をつけている。強い相互作用の基礎理論である量子色力学は <math>SU(3)</math> ゲージ対称性を持つ理論であり、ゲージ原理・ローレンツ不変性に加えて、くりこみ可能性を要請するとその作用はほぼ一意に定まる。量子色力学の作用における唯一の追加可能な項は <math>\theta</math> 項と呼ばれるCP対称性をあらわに破る項であり、実パラメータ <math>\theta</math> は強い相互作用におけるCP対称性の破れの大きさを記述している。中性子の電気双極子モーメントの精密測定は強い相互作用においてCP対称性が極めて強く保たれることを示しており、この世界は <math>\theta = 0</math> の真空に存在していると言える。</p> <p><math>\theta</math> 項はゲージ場に関する全微分項であり、系の古典的な運動方程式に影響を及ぼさない。よって、<math>\theta</math> 項の効果は純粋に量子的である。またその位相幾何学的な性質により、<math>\theta = \pi</math> という特殊なパラメータではCP対称性はあらわに破れない。この点で、<math>\theta = \pi</math> は、この世界の真空 <math>\theta = 0</math> と対をなす真空である。そのようなパラメータ領域での系の量子的な性質を調べることで、系の量子的な側面に対する新たな知見、更にはこの世界の真空に対する相対的な視点を得ることができる。このような理論的な興味にもかかわらず、強結合する場の量子論の標準的な数値的解析手法であるモンテカルロ法の適用は、符号問題と呼ばれる問題のため困難であると思われてきた。</p> <p>本論文では、<math>\theta</math> 項を含むシュウィンガー模型に対してボゾン化法を適用し、<math>\theta</math> 項の量子効果、および、有限温度効果との競合という観点から、モンテカルロ法による第一原理計算によって詳細に解析した。シュウィンガー模型とは 1+1次元時空における量子電気力学であり、1+3次元の量子色力学と電荷の閉じ込めやカイラル・アノマリー、更に非自明な <math>\theta</math> 真空の可能性といった性質を共有する模型である。</p> <p>本論文では、まずシュウィンガー模型の基本的性質を振り返った後、様々なシュウィンガー模型の格子正則化を比較検討し、「ボゾン化法」と呼ばれる、フェルミオンを含む理論を等価なボソン理論に変換する手法を用いることで、<math>\theta</math> 項に伴う符号問題が完全に回避されることを指摘した。この格子正則化ではフェルミオンのダブリング問題が自然に回避され、更に連続理論でのカイラル・アノマリーが格子間隔、す</p>			

なわち紫外発散の正則化因子に関わらず再現される。

本論文では、まずゼロ温度および有限温度でのカイラル凝縮を解析計算およびモンテカルロ計算し、先行研究の結果と比較することでその格子正則化の正当性を確認した後に、オリジナルな研究である、有限温度・有限 $\theta$ 領域におけるシュウィンガー模型の閉じ込めを定量的に議論している。熱浴法を用いた低コストなモンテカルロ計算が可能であるという本手法の利点と再加重法を組み合わせることで、有限温度・有限 $\theta$ のほぼ全域を稠密に覆う弦定数の精密計算を行い、この領域でのシュウィンガー模型の閉じ込めの強さを決定した。

その結果、低温では弦定数が $\theta$ 項に強く影響され、特に $\theta = \pi$ の近くで非整数の電荷対に斥力が働くことを示し、外部電場としての $\theta$ 項と、動的な電荷の対生成に基づく半古典論とを組み合わせることで、このような特異な振る舞いに対する半古典的な解釈を与えた。更に、温度の上昇とともに弦定数の $\theta$ 項依存性が低くなり、高温極限で弦定数が常にゼロとなることを明らかにした。

次いで、 $\theta = \pi$ でのシュウィンガー模型の、温度とフェルミオン質量の平面での相図を、ゼロ温度でのCP対称性の自発的破れに伴う量子臨界点に焦点にあてて探索した。ゼロ温度では、この量子臨界点は、 $Z_2$ 対称性をもつ最も単純な1次元量子系である量子イジング鎖と同じユニバーサリティに属することがわかっている。量子イジング鎖においては、その可解性より、オーダーパラメータの相関関数の漸近形の解析的な表式が知られている。本論文では量子臨界点周辺での $\theta = \pi$ でのシュウィンガー模型における電場の相関関数をモンテカルロ計算し、その相関関数が量子イジング鎖と共通の漸近形を持つことを実証する。これより $\theta = \pi$ でのシュウィンガー模型において、量子臨界点周辺がそれぞれ特異な相関長で特徴づけられる3領域で分類され、更に任意の有限温度においてCP対称性が回復していることが確立された。

本論文ではユニバーサリティに基づいて量子臨界点周辺でのエネルギー・ギャップや電場の振る舞いの予言を行い、それを直接計算の結果と比較している。この比較より、量子臨界点を中心とした幅広いパラメータ領域で、 $\theta = \pi$ でのシュウィンガー模型の振る舞いがユニバーサリティーで記述できるが明らかになった。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、強い相互作用の基礎理論である「1+3次元の量子色力学(QCD)」の低次元の類似系とも言える「1+1次元の量子電気力学(QED)」であるシュウィンガー模型に対して、CP対称性を破る $\theta$ 項を含めた一般的な場合を、ゼロ温度系のみならず有限温度系も含めて、詳細かつ系統的に研究を行っている。ここで、シュウィンガー模型は、電荷の閉じ込めやカイラル・アノマリー、非自明な $\theta$ 真空の可能性といった点で、QCDと似た点を多く含んでおり、半世紀にわたって研究されてきた非摂動的な量子場の理論の模型である。

本論文では、 $\theta$ 項がある場合の、ゼロ温度および有限温度でのシュウィンガー模型に対して、「ボゾン化法」という手法を適用し、非摂動的な第一原理計算であるモンテカルロ計算を実行している。そこでの成果は、これまでに誰も計算することができなかった $\theta$ の領域も含め、世界で初めて得られた結果を多く含み、価値の高いものである。なお、本論文の研究内容の多くは、査読誌に掲載された2編の単著論文に基づくものである。

本論文が独創的で優れている点は、フェルミオンを含む理論に対して、「ボゾン化法」を適用することにより、 $\theta$ 項存在下で現れる困難な「符号問題」を巧みに回避して、モンテカルロ計算が有効に実行可能であることを示し、詳細な計算を遂行したことである。これは、物性系から有限密度QCDまで、物理学で幅広く現れる理論的課題である「符号問題」に対する、1つの処方箋を与え得る画期的な可能性を含むものである。加えて、ボゾン化法により、格子フェルミオンのダブリングの問題も回避でき、低コストの数値計算で解析可能という点も魅力的である。

本論文では、有限温度・有限 $\theta$ 領域における、電荷の閉じ込めに対する様相を、精密計算により定量的に明らかにしており、これは、 $\theta$ 項がある下でのQCDでのクォーク閉じ込め研究の参考にもなり得る。更に、 $\theta = \pi$ でのシュウィンガー模型について、同じユニバーサリティー・クラスに属する1次元量子系である量子イジング鎖との比較から、量子臨界点周辺の相構造を定量的に予言もしている。

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1月17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