

氏 名	谷 口 裕 介
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1798 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻
学 位 論 文 題 目	Yang Mills 理論の非摂動論的な理解

論文調査委員	(主 査)			
	教 授 九 後 太 一	教 授 益 川 敏 英	教 授 堀 内 昶	

論 文 内 容 の 要 旨

Yang-Mills 理論は素粒子の相互作用を記述する基本的な理論である。この理論は多くの重要な局面で非摂動論的な性質を持ち、活発な研究の対象となってきた。申請者はこれらの性質の内、カラー閉じ込めの現象と有限温度でのカイラル対称性の回復、そして漸近自由でない Yang-Mills 理論の解釈、の三点について考察を行っている。

カラー閉じ込めの現象は従来では主に Wilson loop または magnetic monopole 場の真空期待値をオーダーパラメータとして議論されてきた。しかし Wilson loop は系に基本表現の物質場が存在する時にはカラー閉じ込めのオーダーパラメータと成り得ず、また magnetic monopole 場の真空期待値は非摂動論的な解析が困難であるという欠点があった。そのため Yang-Mills 理論のカラー閉じ込めは、万人が信じて疑わない現象であるにもかかわらず、完全には理解されていないのが現状である。一方これらのオーダーパラメータとは別に、物理的な状態にカラーを持った場が現れ得るかどうかを調べる、九後-小嶋のカラー閉じ込め条件と呼ばれるものが存在する。これは Wilson loop と異なり物質場のある時にもカラー閉じ込めのよいオーダーパラメータで有り続けるのであるが、その一方で有効な非摂動論的な解析法が無くカラー閉じ込めの理解にはあまり活用されて来なかった。ただ、畑-九後は、一つの極限模型—物理的モードの自由度を持たない一種のトポロジカルモデルである pure gauge model (PGM)—を考察し、そこではゲージ変換の方向の自由度である pure gauge モードの大きな揺らぎのためにこのカラー閉じ込め条件が非摂動的に満たされている事を示していた。

申請者は九後-小嶋のカラー閉じ込め条件を用いて物質場も含んだ Yang-Mills 理論のカラー閉じ込めを説明するための議論を展開している。まず、物理的なモードを含む Yang-Mills 理論を、PGM を摂動の第 0 次として摂動展開で解析できる様な形に理論を構成している。この理論では PGM の自由度は非摂動論的に、物理的モードに対応する自由度は摂動論的に扱う事が可能である。そして解析の結果、この理論においても PGM の時と同様に pure gauge モードの大きな揺らぎのためにカラーが閉じ込められると

いう描像を得ている。

さて、有限温度におけるカイラル対称性の回復は主に格子ゲージ理論, improved ladder 近似での Schwinger-Dyson 方程式, QCD (量子色力学) のモデルとしての南部-Jona-Lasinio model など調べられてきた。そしてフレーバー数が2の時は、温度 200 MeV で二次の相転移, 化学ポテンシャル 400 MeV で一次の相転移を起こして対称性が回復するという結果が得られている。ただこれらの解析の内, improved ladder 近似での Schwinger-Dyson 方程式を用いたものはどれも更にカイラル対称性を破るような近似を課しており, また結果の物理量を調整できるパラメータを含んでいるため必ずしも満足のゆくものではなかった。これに対して申請者は数値計算を用いてこれ以上近似を課す事無く improved ladder 近似での Schwinger-Dyson 方程式を解き, 実験値以外のパラメータで調整される事の無い結果を得た。その結果はフレーバー数が2の時は、温度 169 MeV で二次の相転移, 化学ポテンシャル 598 MeV で一次の相転移を起こして対称性が回復するというものである。また、温度 169 MeV での臨界指数を求めており, これから improved ladder 近似が平均場近似とは異なる近以である事を確かめている。

ところで Yang-Mills 理論に十分多くの物質場を加えると理論は漸近自由でなくなってしまう。このような理論は triviality の議論から場の理論としては意味が無いとみなされてきた。しかし、申請者は、この理論を cut-off 理論として解釈すれば意味のある理論であり, ある高エネルギーでの点でゲージ結合定数が発散してしまう事は、ダイナミカルに現れたゲージ場がこの点で消失してしまうという複合性条件として理解できる事を示した。特に具体的な例として, N_f 個のスカラー場と結合する Yang-Mills 理論は N_f が十分大きな近似では, 1-loop の解析から隠れたゲージ対称性を持つ四次元の $SU(N_f) / SU(N_f - N_c) \times SU(N_c)$ 非線型 σ 模型にダイナミカルゲージボソンが現れたものと見なし得る事を示した。

論文審査の結果の要旨

Yang-Mills ゲージ理論は、量子色力学 (QCD) を初めとして、素粒子の相互作用を記述する基本的な理論である。この理論は多くの重要な局面で非摂動的な性質を持ち、活発な研究の対象となってきた。申請者はこの申請論文で、カラー閉じ込めの現象と有限温度でのカイラル対称性の回復、そして漸近自由でない Yang-Mills 理論の解釈、の三つの問題について考察を行なっている。

まず、第一のカラー閉じ込めの現象は、従来主に Wilson loop または magnetic monopole 場の真空期待値をオーダーパラメータとして議論されてきたものである。しかし Wilson loop は系に基本表現の物質場が存在する時にはカラー閉じ込めのオーダーパラメータと成り得ず、また magnetic monopole 場の真空期待値は非摂動的な解析が困難であるという欠点があった。これとは別に、物理的な状態にカラーを持った場が現れ得るかどうかを調べる、九後-小嶋のカラー閉じ込め条件と呼ばれるものが存在する。これは Wilson loop と異なり物質場のある時にもカラー閉じ込めのよいオーダーパラメータで有り続けるのであるが、その一方で有効な非摂動的な解析法が無くカラー閉じ込めの理解にはあまり活用されて来なかった。ただ、畑-九後は、一つの極限模型 — 物理的モードの自由度を持たない一種のトポロジカルモデルである pure gauge model (PGM) — を考察し、そこではゲージ変換の方向の自由度である pure gauge モードの大きな揺らぎのためにこのカラー閉じ込め条件が非摂動的に満たされている事を示してい

た。

申請者は九後-小嶋のカラー閉じ込め条件を用いて物質場も含んだ Yang-Mills 理論のカラー閉じ込めを説明するための議論を展開している。まず、物理的なモードを含む Yang-Mills 理論を、PGM を摂動の第 0 次として摂動展開で解析できる様な形に理論を定式化し、ゲージ変換の方向の自由度は非摂動論的に、物理的なモードに対応する自由度は摂動論的に扱う事を可能にした。この定式化の下でいくつかの Green 関数を解析し、この理論においても PGM の時と同様に pure gauge モードの大きな揺らぎのためにカラーが閉じ込められるという描像が成立していることを示した。

第二に、有限温度におけるカイラル対称性の回復を議論している。この問題は従来主に格子ゲージ理論、improved ladder 近似での Schwinger-Dyson 方程式、QCD (量子色力学) のモデルとしての南部-Jona-Lasinio model などで調べられ、フレーバー数が 2 の時は、温度 200 MeV で二次の相転移、化学ポテンシャル 400 MeV で一次の相転移を起こして対称性が回復するという結果が得られていた。ただこれらの解析の内、improved ladder 近似での Schwinger-Dyson 方程式を用いたものはどれも更にカイラル対称性を破るような近似を課しており、また結果の物理量を調整できるパラメータを含んでいるため必ずしも満足のゆくものではなかった。これに対して申請者は数値計算を用いてこれ以上近似を課す事無く、勝手なパラメータを含まない形で improved ladder 近似で Schwinger-Dyson 方程式を解いた。その結果、フレーバー数が 2 の時は、温度 169 MeV で二次の相転移、化学ポテンシャル 598 MeV で一次の相転移を起こしてカイラル対称性が回復するという結論を得た。また、温度 169 MeV での臨界指数も求めており、これから improved ladder 近似が平均場近似より良い近似である事を確かめている。

第三に漸近自由でない Yang-Mills 理論を扱っている。Yang-Mills 理論に十分多くの物質場を加えると理論は漸近自由でなくなる。この様な理論は通常 triviality の議論から場の理論としては意味が無いとみなされてきた。しかし、申請者は、この理論を cut-off 理論として解釈すれば意味のある理論であり、ある高エネルギーでの点でゲージ結合定数が発散してしまう事は、ダイナミカルに現れたゲージ場がこの点で消失してしまうという複合性条件として理解できる事を示した。特に具体的な例として、 N_f 個のスカラ場と結合する Yang-Mills 理論を議論し、 N_f が十分大きな近似では、1-loop の解析から隠れたゲージ対称性を持つ四次元の $SU(N_f) / SU(N_f - N_c) \times SU(N_c)$ 非線型 σ 模型にダイナミカルゲージボソンが現れたものと等価である事を明確にした。

よって、本申請論者は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。