

| | |
|---------|---|
| 氏名 | 奥出 壮 |
| 生年月日 | |
| 本籍 | 愛知県 |
| 学位の種類 | 博士(理学) |
| 学位記番号 | 博甲第263号 |
| 学位授与の日付 | 平成10年9月30日 |
| 学位授与の要件 | 課程博士(学位規則第4条第1項) |
| 学位授与の題目 | MonopoleとQuench近似におけるSU(3)QCDのhadron spectrum |
| 論文審査委員 | (主査) 鈴木 恒雄 (副査) 寺尾 治彦, ミカエル・イルゲンフリッツ, 青木 健一, 末松 大二郎 |

学位論文要旨

'tHooft's idea is very interesting that explains the quark confinement. SU(3) QCD is reduced to $U(1)^2$ theory with monopoles and color charges by abelian projection that is a partial gauge fixing. If the monopoles condense, the linear potential between the quark-antiquark is realized.

We study quenched hadron spectra with Wilson fermion in abelian gauge fields extracted by maximal abelian projection and in fields induced by monopoles on $16^3 \times 32$ and $24^3 \times 48$ lattices. Pion mass squared and quark mass defined through the axial Ward identity satisfy the PCAC relation. Gross features of the light hadron spectra are almost similar to those in SU(3) gauge fields if normalization is made by the square root of the string tension. It is also shown that no sizable dynamical mass generation is found in the present range of κ when the monopole degree of freedom is removed from the abelian fields or from the SU(3) gauge fields.

1 始めに

核子をなす陽子、中性子などハドロンが、クォークと呼ばれる素粒子三つからなっている事実は、さまざまな実験や観測に強く支持され、いまや周知である。しかしこのクォークモデルはクォークの閉じ込め問題と呼ばれる一つの大きな問題を抱えている。実験において単独のクォークがみつからないのである。クォーク同士の間で働く「強い相互作用」を記述する量子色力学(QCD)は、理論が閉じ込めの可能性を持つ事を示しているが、詳しい機構は分かっていない。

しかし1981年、オランダの'tHooftにより、閉じ込めを説明する一つの有望なシナリオが提出された。クォーク間に働く強い相互作用は、SU(3)の対称性を持つ量子色力学によって記述されることは、すでに分かっていた。このSU(3)の対称性を $U(1)^2$ に落す(アーベリアン射影)と、モノポールと、カラー電荷を持つクォークを含んだ理論となる。このモノポールが真空中に凝縮し、ちょうど超伝導現象と双対の現象(dual Meißner効果)が引き

起こされている、と仮定するのである。すると超伝導における磁束に相当する「カラー電束」が、squeeze されてクォークと反クォークをむすぶひもとなり、クォークと反クォーク間に距離に比例するポテンシャルをつくるのである。

2 動機

しかしこれは仮定に過ぎず、それが実際に起こっている事を示す解析は非常に困難であり、いまだに成功していない。しかしながら、コンピュータを用いた格子上のモンテカルロシミュレーションは、このモデルの正当性を強く支持している。例えばクォーク-反クォーク間の張力 (string tension) や、非閉じ込め相転移のオーダーパラメータであるポリヤコフループを、アーベリアン射影の後に、SU(3) 変数のグルーオンから U(1) 変数のみを抜きだして計算すると、SU(3) 変数で計算した値や性質を再現する (アーベリアンドミナンス)。また U(1)² 変数をモノポールの寄与とフォトンの寄与に分けて計算すると、モノポールの寄与は同様に SU(3) の値や性質を再現する (モノポールドミナンス)。このことは閉じ込め機構に対して U(1)² 部分、特にその中のモノポールの寄与が重要な役割を果たしている事を示している。

今回の研究では、グルーオンの U(1)² 変数やモノポールの寄与からハドロンスペクトラム (素粒子、特に up クォークと down クォークからなる軽いハドロン) の質量を求め、dynamical な質量生成におけるモノポールの役割を調べた。ハドロンの質量生成の起源については、QCD を基盤とした定性的な研究はほとんどない。もしこの研究でアーベリアンドミナンスやモノポールドミナンスが見つければ、ハドロン質量の研究の重要な足掛かりとなるであろう。実際に格子 SU(2) の理論では、広島大の宮村教授によりハドロン質量のアーベリアン/モノポールドミナンスが見つかった。

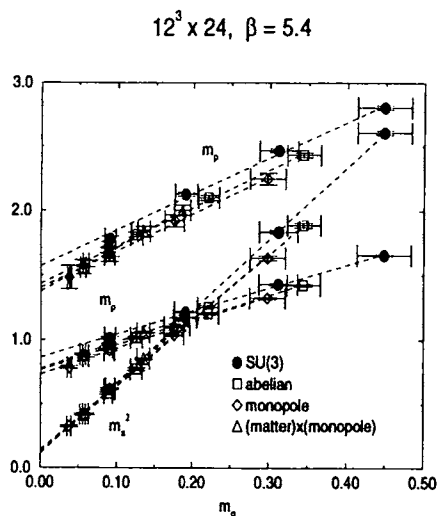


図 1: Hadron mass vs. quark mass.

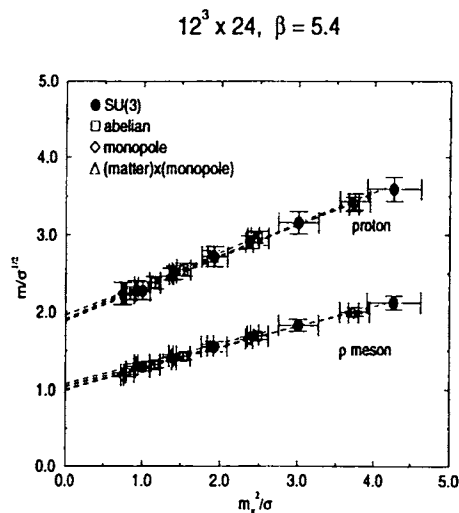


図 2: $\sigma^{1/2}$ で normalize した hadron mass.

3 今回の研究

今回の研究では、計算の簡単のため、dynamical クォークを考慮しない quench 近似を用

いた。クォークとしてはウィルソンフェルミオンを用いた。次のグルーオンを、ハドロンスペクトラムを計算するときの background とした。

- SU(3)
- アーベリアン (U(1)²)
- モノポール の寄与
- フォトン の寄与
- SU(3) から モノポール の寄与を抜いたもの

4 研究結果

図 1 は上の場のうち フォトンの場以外を background として、クォーク質量ごとに計算したハドロン (π : パイオン、 ρ : ローメソン、 p : 陽子) の質量である。4 つの場について、理論面から予想される PCAC relation:

$$m_q \propto m_\pi^2 \quad (1)$$

という比例関係がよく見えている。

ところで、コンピュータシミュレーションで求まる物理量は、すべて無次元量である。例えば質量 m は ma の形で求まる。 a は格子間隔で、「1/質量」の単位を持っている。図 1 からわかるように、場が違くと格子間隔も少しずつ異なっている。一方 string tension σ は「質量²」の次元なので、ハドロンの質量 ma を string tension の平方根 $\sqrt{\sigma}a$ で割ってやれば、格子間隔 a によらない比

$$\frac{m}{\sqrt{\sigma}} \quad (2)$$

が求まる。これをグラフにしたのが図 2 である。これを見て分かるように、SU(3), アーベリアン, モノポール, そしてフォトン を抜いた場の 4 つの background で計算したハドロンの質量と string tension の比は、現在計算したクォーク質量の範囲内で、ほとんど一致している。ハドロン質量においても、アーベリアンドミナンス, モノポールドミナンスが発見されたことを示している。

図 3 は、クォーク質量をゼロにした時 (chiral limit) のときの比 $m/\sqrt{\sigma}$ である。4 つの場での値が、誤差の範囲でよく一致している。

また、フォトン 場と、SU(3) から モノポール の寄与を抜いた場では、図 4 で見るように、 π と ρ の質量はほとんど一致し、図 1 のように、 $m_q \rightarrow 0$ の極限で m_ρ (m_p も同様) は有限とはならず、

$$\lim_{m_q \rightarrow 0} m_\rho \simeq 0 \quad (3)$$

となった。この結果は、クォーク同士が相互作用していない場合の計算 (free) と酷似している。これは、モノポールがない場合には dynamical な質量生成がないことを示している。

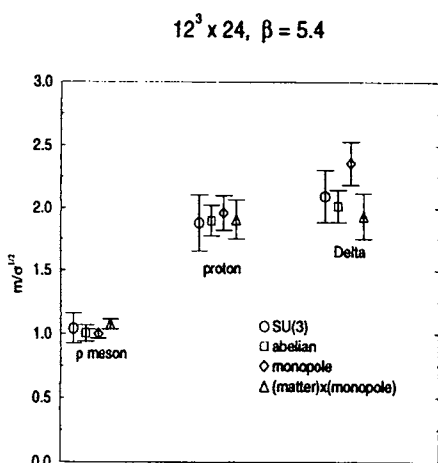


図 3: m_π^2 の fit で求めた chiral limit における、 $\sigma^{1/2}$ で normalize した hadron mass.

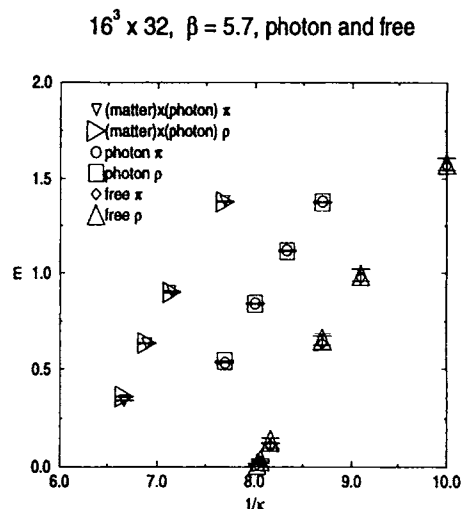


図 4: pion and ρ mass vs. κ in the monopoleless fields and in the free field.

5 まとめ

ハドロン質量におけるアーベリアンドミナンス, モノポールドミナンスを調べるため、格子コンピュータシミュレーションを用いて SU(3), アーベリアン, モノポール, フォトンそして SU(3) からモノポールを抜いた場でハドロン質量をはかった。以下の二つの大きな結果を得た。

1. ハドロン質量においてもアーベリアンドミナンス, モノポールドミナンスが発見された。
2. background の場からモノポールの寄与を取り除いた時には、dynamical な質量生成はなかった。

これらの結果は、SU(3) 真空において 'tHooft の dual Meißner 効果が起こっている事を強く支持している。

学位論文審査結果の要旨

本審査委員会は、審査の結果、上記学位論文に関して以下のように判定した。

本論文は、素粒子物理学における最大の未解決問題の一つである質量生成問題を赤外領域の QCD ではモノポールが本質的であるという立場からモンテ・カルロ法を使った計算機シミュレーションで研究した結果を記述している。QCD において、可換部分群のみを残すアーベリアン射影と呼ばれるゲージ固定を行うと、QCD がモノポールを含む可換ゲージ理論とみなせる。彼のグループはこの QCD におけるクォークの閉じ込めがモノポールの凝縮によって説明されるという立場で研究してきており、クォークを含まないグルオンのみの系で、予測を裏付ける興味ある結果を得てきている。

この論文では、グルオンのみでなく、クォークを考察し、クォークから構成される軽いハドロンの質量生成が、アーベリアン成分やモノポール成分の寄与のみで説明されるかどうかという点を、クエンチ近似とよばれる近似の範囲でモンテ・カルロ法を使った計算機シミュレーションで研究し、大変興味ある結果を得ている。1) アーベリアンやモノポールのみで、ハドロン世界の特徴であるカイラル対称性の自発的破れを示す PCAC 関係式が良くなり立っていることを発見した。2) パイオンの質量の二乗とその他のハドロン(陽子、デルタ、ロー)の質量が良い比例関係にあることを発見した。このことは、パイオンがカイラル対称性の自発的破れによる NG ボゾンであることと整合している。3) 弦定数の平方根と質量の比は無次元量であるが、アーベリアンやモノポールのみで良く再現されるということを発見し、質量生成におけるアーベリアン、モノポールドミナンスがこの場合も成立することを示した。4) モノポールのみ除いた背景では、質量ギャップがないことがわかった。

これらの発見は、その一部が 1995 年の格子国際会議で本人によって発表されている。更に、本論文は、参考論文や副論文の内容を中心に、関連する他の研究のレビューを含めてたいへん良く書かれている。

以上の点から委員会は本論文が博士論文として値すると結論した。