

氏名	北原俊一
生年月日	
本籍	長野県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第128号
学位授与の日付	平成7年3月25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SU(2) lattice QCDの有限温度相転移 (Monopoles and deconfinement transition in $T \neq 0$ SU(2) lattice QCD)
論文審査委員	(主査) 鈴木恒雄 (副査) 青木健一, 末松大二郎 久保治輔, 田村博志

学位論文要旨

The role of monopoles in the deconfinement transition is discussed in the framework of abelian projection in the maximally abelian gauge in $T \neq 0$ SU(2) QCD. Only one (or a few near β_c) long connected monopole loop exists uniformly through the whole lattice in each vacuum configuration in addition to some very short loops in the confinement phase and the long loop disappears in the deep deconfinement region. Monopole action can be calculated from monopole current configurations similarly as in $T=0$ SU(2) QCD. In the confinement phase the monopole action is independent of N_s and N_t , i.e., of the lattice volume and the action obtained seems the same as that given in $T=0$ QCD. In $T \neq 0$ QCD there exists a maximally extended monopole contrary to the case of $T=0$ SU(2) QCD where larger and larger extended monopoles become important. Energy-entropy balance of the long loops of maximally extended monopoles explains the existence of the deconfinement transition and reproduces roughly the value of the critical temperature. However more intensive studies are needed to clarify the transition mechanism definitely.

ハドロンの構成要素であるクォークが単体では観測されないというクォーク閉じ込め問題に関する研究である。クォークとグルオンの相互作用は量子色力学(QCD)で記述されると考えられており、その系の計算機実験からクォーク閉じ込めの事実は得られているが、なぜそのようなことが起きるかといった閉じ込めの機構は十分な理解が得られていない。

一般的にクォークの閉じ込めは、真空が完全“反電性”的に振る舞うことにより起こると思われている。それとちょうど電荷と磁荷を入れ換えたような状況が超電導である。超電導では電子対が凝縮を起し、超電導体は完全反磁性体となっている。そのなかに磁場が入ったとき、磁束は線状に絞られる。もし真空が color 電荷に対し完全反電性として振る舞うとき、クォーク、反クォークの間の電場は紐状に絞られる。その紐のエネルギーは長さに比例することから、クォーク、反クォークを無限に引き離すために無限のエネルギーを必要とすることになる。すなわちクォークは単体で観測されない

ことになる。その描像を QCD から引き出すため、t'Hooft により提唱された QCD の abelian projection に注目する。QCD の abelian projection とは QCD の $SU(3)$ ゲージ対称性のうち、その極大トーラス部分群 $U(1)^3$ の対称性を残すような部分的ゲージ固定を行うことである。このゲージ固定後はアーベリアン ($U(1)^3$) の channel に monopole が現れる。これにより QCD を monopole を含むアーベリアンの理論とみなすことができる。もしこの monopole がボーズ凝縮を起こせば、電荷を持ったクォーク、グルオンはデュアルな Meissner 効果により閉じ込められる。

アーベリアンの対称性の残し方は無限に存在するが、maximally abelian gauge と呼ばれるゲージをとった場合、monopole 凝縮によるクォーク閉じ込め描像を支持する結果がモンテカルロシミュレーションにより数多く得られている。まず一つには、閉じ込めに関する量はアーベリアンのゲージ場だけで、ほぼ元のゲージ場を使って得る値、またはその振る舞いを再現することがあげられる。さらに、そのアーベリアンゲージ場だけで計算される量は monopole と photon の寄与に分離することができ、閉じ込めに関わる量は monopole の寄与が本質的であることがわかってきた。さらに、これらのアーベリアンゲージ場の支配性の事実は QCD ラグランジアンから、非対角要素を積分したあとのアーベリアンの有効作用の存在を示唆する。柴-鈴木によりそれを格子上でデュアル変換した後の monopole current で書かれた作用が求められた。QCD の長距離での性質を調べるには格子上で block spin 変換を行うことが有効だが、その操作をしていることに相当する、より大きい cube で定義された extended monopole を使ったときも同様に作用が求められた。その作用は monopole の extendedness を n とし、格子常数を a とすると $b = n \times a$ のみに依存している。作用は自己エネルギー項が支配的で、この項の結合定数と 4 次元空間内で monopole current のつくる loop の単位長さ当たりエントロピー $\ln 7$ を比較することにより相転移点を知ることができる。 $\ln 7$ は monopole loop の振舞いが non-backtracking random walk で近似的に現れるとした結果である。0 温度系では extendedness を大きくすると相転移点は β 大きい方にずれる傾向が見られた。このことは、先ほどの有効作用が b のみに依存していることを考慮すると、相転移点 β_c^n に対し一定の $b_c = a(\beta_c^n) \times n$ が存在することを意味する。もしこれらの事実が系の体積が無限大でも正しいとすると、無限に大きい extended monopole は常に凝縮を起こしていることがわかる。

この考え方に基づいて格子 QCD の有限温度相転移がどのように理解されるかがこの論文の主な内容である。有限温度系の場合は時間方向の格子の自由度が有限なため、無限に大きい extended monopole を考えることはできず、extended monopole に maximum size が存在し、そのことが非閉じ込め相転移が有限な β_c (すなわち有限な温度 T_c) で起こることの理由になるのではないかと、ということが予想される。

まず、monopole の有効作用を有限温度系で求める。有限温度系の場合は時間、空間を分けて調べることが必要であるが、系が閉じ込め相にあるとき有効作用は格子のサイズに全く依らず、0 温度系の作用と全く同じであることがわかった。さらに、monopole の有効作用が自己エネルギー項だけでよく近似されること、さらに、自己エネルギー項の結合定数と monopole loop 長の積でもよく近似されることを確かめた。そのことは、monopole current は磁荷が ± 1 のものが支配的であることによる。次に、閉じ込め相では非常に長い一本の loop が存在し、残りの loop は短いものになっていることがわかった。相転移点に近づけると、その長い loop の長さは短くなり、いくつかのより短い loop に分かれることもある。さらに系が非閉じ込め相に入ってくると長い loop は消えてしまう。クォーク間の紐の強さは、長い一本の loop からの寄与だけで再現されることがわかっており、長い monopole loop は閉じ込め機構に重要な寄与をしていると考えられる。次にその長い loop に注目し、その格子空間内での分布を調べた。重心からの 2 乗平均距離を調べることにより、閉じ込め相では格子空間内に長い loop がほぼ一様に分布していることがわかった。非閉じ込め相では一様性は壊れていた。Monopole current は全 link 数の約 10% しか占めていないことから、閉じ込め相での結果は current 間にある反発力が働いていると考えることができる。その反発力を調べるため、格子の体積を loop 長

で割った量の3乗根を計算した。その量は current の周りのある排除体積を表すと考えられる。その量はどのような n^3 extended monopole を考えた場合でも、 β を下から相転移点に近づけると、時間方向の有効な自由度の半分 ($N_t/2n$) に下から近づいた。このことにより、monopole loop のエントロピーは常に時間方向の自由度が2であるような格子で考慮すべきであるとわかる。

ここで、extended monopole の maximum size とは何かを考えてみる。空間方向の monopole current を定義するためには、すくなくとも時間方向に2つの自由度が必要である。このことは、extended monopole の maximum size は $N_t/2$ であることを意味する。このとき、長い monopole loop の、 $N_t=2$ の lattice 上でのエントロピーはどうなるであろうか。これまでに見たように、長い monopole loop は簡単な non-backtracking random walk より、むしろある強い反発力が働くという条件を持つ random walk のように振る舞うと考えられる。ところが、そのような条件をもつ random walk のエントロピーを直接評価することは難しいため、monopole loop 長に対する histogram を用いて評価した。Histogram は Gauss 型の分布になり、それを2次までの多項式で fit し、その線形の項が0になる点でエネルギーとエントロピーがバランスしていると考えた。 $N_t=4$ の場合にこのことを行った結果、Polyakov loop から求められる $\beta_c=2.298$ に対し、2.35 付近を予言した。この結果は、考え方が簡単であることを考慮するとむしろ良くあっていると思われる。

これらのことにより、QCD の有限温度相転移は考え得る最大のサイズである $(N_t/2)^3$ monopole のエネルギー、エントロピーのバランスでほぼ説明がつくことがわかり、そのことは必然的に相転移点を有限にすることが明らかになった。しかしながら、この相転移のメカニズムが正しいかどうかは相転移点近傍の lattice の有限 size 効果をより詳しく調べる等、より徹底した研究を行わなければならない。

学位論文の審査結果の要旨

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有限温度での QCD における閉じ込め-非閉じ込め相転移の機構をモンテ・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、この相転移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いる。これまで1) 最大可換ゲージとよばれるゲージでアーベリアン射影後、可換ゲージ場のみでクォークの閉じ込め現象として知られている特徴が大変にきれいに再現できること。2) 更にモノポールのみで閉じ込めの特徴的な量が再現できること。3) 閉じ込めを記述する有効モノポール作用がもとまり、ゼロ温度系で無限大体積のもとでは、QCD はモノポール凝縮相にあることなど興味ある結果を導いている。

この論文では、有限温度での相転移が、同様にエントロピー・エネルギー釣合によるモノポール凝縮で説明されるというたいへん興味のある結果を示している。1) 有限温度系でも、有効モノポール作用が決まり、閉じ込め相ではゼロ温度系と同じである。2) モノポールは、閉じ込め相では、長い1本のループと少数の短いループになっており、閉じ込めに重要なのは長いループのものである。3) 長いループは、時空間を一様に分布している。4) モノポールの回りには、斥力の効果で排除体積の様なものがあり、これを考慮すると、どの拡張されたモノポールも同じエントロピーをもつと考えられること。5) 閉じ込め-非閉じ込め相転移を決めているのは、時間(温度)方向が2となる拡張されたモノポールであり、ヒストグラムから求めたエントロピーから決定した相転移点は実験値に近いことが示された。更に、

1) 共同研究とはいえ、参考論文、副論文ともプログラムの開発から、計算の実行まで彼が中心的に

行っている。

- 2) 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。
- 3) 本人は、計算の実行のため進んで高エネルギー研究所に長期に亘って滞在し、計算の技術の取得や誤差の評価法などを学び、また1992年9月アムステルダム、1994年10月ビーレフェルトと国際会議で発表している。この様な積極的な姿勢は高く評価できる。

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。