

論文内容の要旨

論文題目 Center Symmetry in the Presence of Dynamical Quarks
(中心対称性の動的クォークへの拡張)

氏名 福嶋 健二

量子色力学 (Quantum-Chromo-Dynamics) は強い相互作用の基本理論として広く受け入れられているが、理論自身が非線型性を持っているうえに強い相互作用を非摂動的に取り扱う必要があるため、量子色力学を直接用いて現実の物理系を記述することはたいへん難しい問題である。しかしまたこれらの非線型性や非摂動的側面が、「色」の閉じ込め・chiral 対称性の自発的破れ・漸近的自由性といった興味深い物理的内容をもたらすことも知られている。量子色力学の基本的自由度である quark 及び gluon が実験的に観測されていないのは、色自由度が閉じ込められているためだと考えられており、また、chiral 対称性の自発的破れに伴う南部 - Goldstone 粒子が、 π 中間子や K 中間子などの軽い粒子に対応することが明らかにされている。漸近的自由性は強い相互作用の結合定数が高エネルギーの反応で有効的に小さくなることを示しており、運動量移行の大きい領域での実験結果を摂動的手法によって解析することを可能にしている。

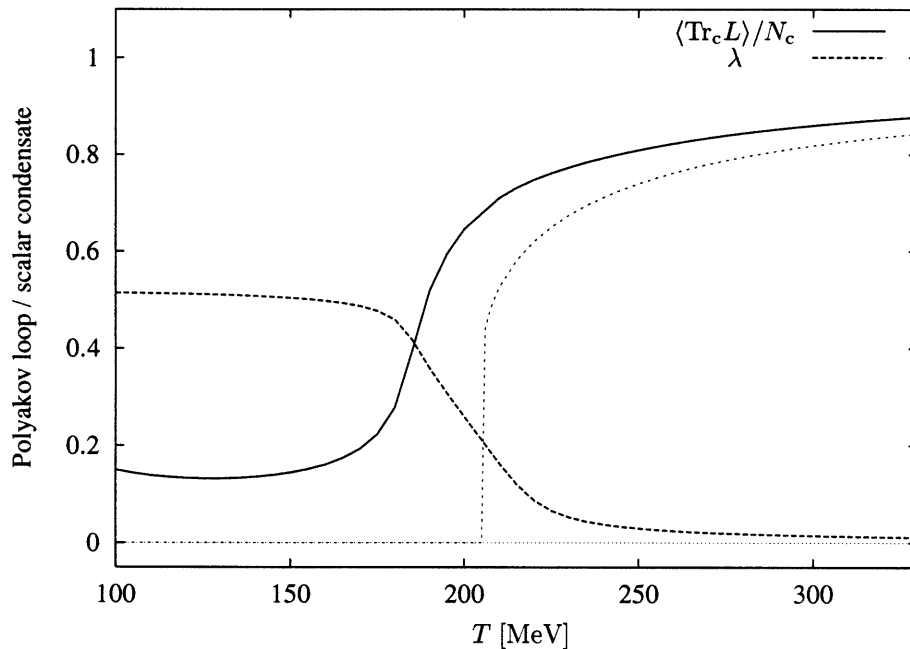
量子色力学によって記述される物理系は、系の温度を上げていくと chiral 相転移および非閉じ込め相転移を起こすことが理論的に予言されている。即ち、高温状態のもとでは quark の持つ chiral 対称性が回復し、また、色の自由度が解放されることによって quark と gluon のプラズマ状態 (Quark-Gluon-Plasma) が実現されるものと考えられている。近年の粒子加速器技術の発展に伴い人工的に Quark-Gluon-Plasma を作り出すことが可能になりつつある現在、有限温度あるいは有限密度における量子色力学の理論的解析に、より多くの関心が寄せられてきている。

興味深い問題のひとつとして、chiral 相転移と非閉じ込め相転移との関係について様々な議論がなされてきた。chiral 対称性の破れも色の閉じ込めも、どちらも量子色力学の強い非線型性に起源を持っているため、何らかの物理的な相互関係があることは容易に想像される。ところがこれらの間の相互関係を調べることは、次のような事由により非常に難しい問題となる。まず一方で、chiral 対称性は quark の質量を無視できる極限で見られる性質であり、chiral 相転移を明確に定義

するためには quark の質量をゼロにする極限を考えねばならない。他方、非閉じ込め相転移を明確に定義する方法は、quark のない仮想的な世界においてのみ、つまり quark の質量を無限大にする極限においてのみ知られている。このように chiral 相転移と非閉じ込め相転移とは quark の質量に関して正反対の極限において初めて特徴付けられるため、これらを同時に扱うことは著しく困難なのである。

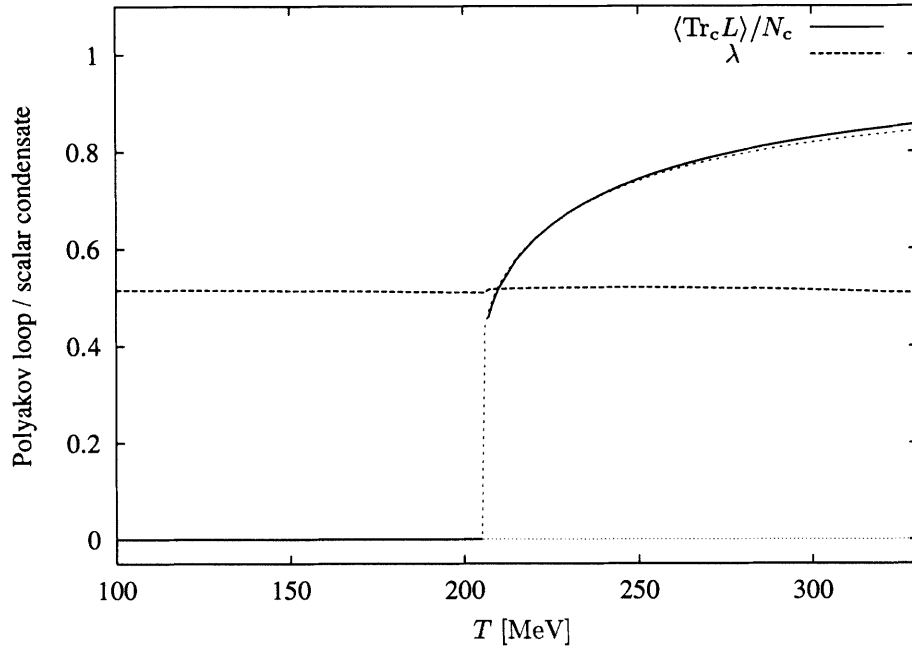
しかし動的な quark を含む系に対しても、相を明確に定義する方法が知られていないとはいえ、閉じ込め相 - 非閉じ込め相を区別することは原理的には可能はずである。quark を含まない理論では Polyakov loop と呼ばれる物理量が、非閉じ込め相転移を特徴付ける物理量として用いられる。Polyakov loop は直接実験的に観測され得る物理量ではないが、格子上の数値実験においては最も重要な実験結果のひとつとして測定される量である。理論に quark が含まれると Polyakov loop は常に非閉じ込め的な振る舞いを示すようになり、それは格子上の数値実験でも検証されている。この振る舞いは quark の対生成・対消滅による遮蔽効果の結果であり、非閉じ込め相で色自由度が解放されることにより引き起こされる遮蔽効果と明確には区別され得ない。このことが動的 quark を含む系における相の定義を不明確にしてしまうのである。

我々はまず、量子色力学の強結合極限および多次元極限を取ることで、非閉じ込め相転移の指標である Polyakov loop と chiral 相転移の指標である scalar meson condensate の振る舞いを同時に記述する有効作用を導出した。この有効作用自体は既に知られているものではあるが、これまでの研究においては不適切な近似を用いた解析しかなされていなかった。そこで我々は計算の方法を適切なものに改めて、物理量を再評価してみた。以下がその結果である。



図中の $\langle \text{Tr}_c L \rangle / N_c$ が Polyakov loop を表しており、 λ が scalar condensate である。比較のために quark を含まない理論における Polyakov loop の振る舞いを点線で示してある。chiral 相転移が Polyakov loop の振る舞いに支配的な影響を及ぼすという考えや、閉じ込めと chiral 対称性を結び付ける普遍的なアイデアなども有効模型の範囲内で具体的に検証した。その結果、有効模型自体の簡単さにもかかわらず、全体的な性質がよく再現されていることが分かった。

次に我々は、動的 quark が存在する系での非閉じ込め相転移の意味を明瞭にするために、quark の励起に対して物理的制限を課した canonical ensemble を導入した。ところが canonical ensemble への射影は熱力学的極限のもとで無効になってしまうのである。この不具合の理由と解決法を詳らかにするために、我々は簡単な有効模型として Ising 模型を採用し、Ising 模型の熱力学的性質を解析的および数値的に調べることによって発見法的に、必要とされる拘束条件を見付けることに成功した。ここで得られた成果を、Polyakov loop と scalar condensate の有効模型に用いた結果が以下の図である。



ここで注目すべきことは、canonical ensemble を採ったことにより chiral 相転移が見られなくなってしまったことである。有効作用の構造を詳細に調べることによって、その理由は次のように明らかにされた。この模型において、温度依存性は quark の温度揺らぎとして取り入れられている。しかしそのような quark の自由な揺らぎは canonical ensemble では許されない。そのため quark は常に 3 つの組として励起されねばならず、1 つの quark あたりの温度は有効的に 1/3 倍されることになる。ところがもしも温度依存性を π 中間子の温度揺らぎとして取り入れていけば、中間子は canonical ensemble への射影のもとで大きな修正を受けないと考えられるので、chiral 相転移に対する大きな影響はあり得ないはずである。通常 NJL 模型など quark を基本的な自由度として持つ有効模型では quark の温度揺らぎをそのまま扱っているが、ここで我々の得た結果は、NJL 模型などの有限温度系への適用に対して、一般的に、本質的な疑問を投げ掛けるものであり、見過ごされてきた問題点を浮き彫りにする顕著な例として興味深いものである。また中間子の温度揺らぎは Polyakov loop に対しては大きな修正を与えないと考えられるので、ここで我々の得た結果のうち Polyakov loop の振る舞いについては、正当性を期待することができる。上図から明らかかなように、canonical ensemble での Polyakov loop の振る舞いは quark が含まれない場合での振る舞いとほぼ一致しており、それに伴い相転移温度が高くなるものと推論される。