

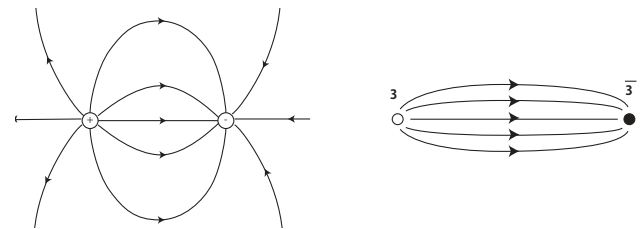
コラム2

クォークの閉じ込め

岡 真・東京工業大学

強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)のラグランジアン構成要素はクォークとグルーオンであるが、これらの“素粒子”は実験室では観測できない。これは、クォークやグルーオンがSU(3)対称性に基づく電荷(カラー)を持ち、カラー電荷が0(SU(3)の1重項)のハドロン中に閉じ込められているからである。真空中ではクォークもグルーオンも、さらに一般にカラーが0でない状態は、単体では存在できない。よく似たゲージ場の理論で、電磁場と通常の電荷を持つ粒子の運動を記述する量子電気力学(QED)では、電荷を持った粒子(例えば電子)が単体でも観測される。これは、図C.2.1(左)のように電荷によって作られる電場が周囲に広がっていくために、電荷間に働くクーロン力が遠方では0になるからである。一方で、QCDでは、カラー電荷によって作られるカラー電場が棒状のフラックスとなって広がらないために、力が距離によらずほぼ一定となる。長距離ではカラー電場のエネルギーがカラー電荷間の距離に比例して増大するため、カラー電荷が離れることが出来ない。

このQEDとQCDの違いは、媒質(真空)の性質の違いと考えられる。すなわち、QCD真空は、カラー電場を小さい体積に閉じ込めようとして、カラーフラックスが棒状に配置する。類似の現象は電磁場の場合も超伝導体中でマイスナー効果による磁場フラックスの閉じ込めとして起こる。QCD真空では、電場に対してこれが起こるため、双対マイスナー効果と呼ばれる。



図C.2.1: (左) 正電荷(+)と負電荷(-)によって作られる電場の電気力線。(右) カラー電荷: クォーク3と反クォーク $\bar{3}$ によって作られるカラー電場。

これが真空(基底状態)の性質を反映していることは、媒質の温度や化学ポテンシャルなどの外部変数を変えることによって明らかになる。QCDでは、低温・低密度ではクォークやグルーオンなどのカラーはハドロン中に閉じ込められているが、宇宙の初期(ビッグバン直後)に存在したような高温高密度媒質中では、ハドロンの密度が高くなって、クォークやグルーオンが個々のハドロンから解放されてばらばらになって飛び回るプラズマ状態が出現すると予想されている。実際、RHICやLHC加速器において行われた高エネルギー重イオン衝突実験において、高温高密度の新しい物質状態が生まれているとする証拠が得られつつある。また、高密度天体(中性子星等)の中心部などにも、カラー閉じ込めから解放されたクォーク・グルーオン物質が存在する可能性があると考えられている。

このような基底状態の性質の温度・密度依存性は相転移現象と考えられるが、その相転移を特徴づける物理量は、ポリヤコフープとカイラル凝縮の2種類である。ポリヤコフープは(重い)カラー電荷の自由エネルギーで与えられる量で、カイラル凝縮は軽いクォークのカイラル対

称性の自発的破れに対応する量である。有限温度で QCD の基底状態を計算した格子 QCD 計算の結果によると、図 C.2.2 に示すように、これらがほぼ同じ温度で急激に変化し、基底状態の性質が大きく変わっていることを示している。

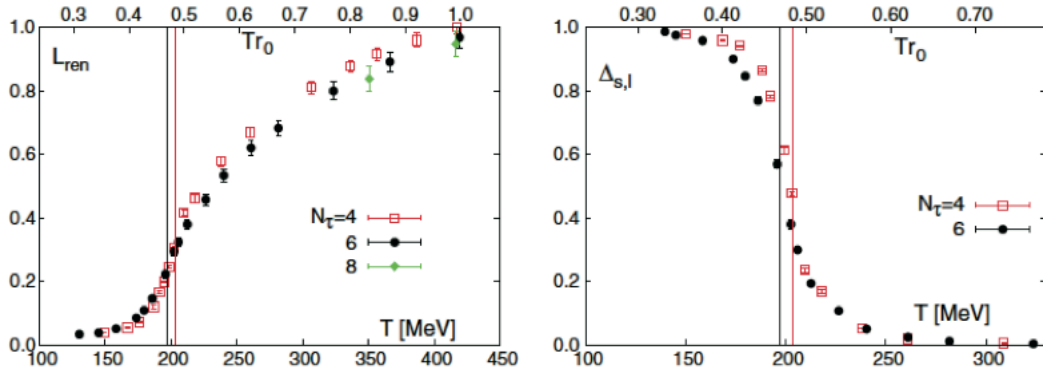


図 C.2.2: 格子 QCD 計算による (左) ポリヤコフープ (右) カイラル凝縮の温度変化 (M. Cheng et al., Phys. Rev. D77, 014511 (2008)より転載)。

クォークをハドロンの中に閉じ込める力は、カラー電場が棒状に分布することから、長距離で距離 r に比例する線型のポテンシャルであることが予想される。実際に格子 QCD によって計算された、固定したクォークと反クォーク間のポテンシャルエネルギーは、図 C.2.3 に示すように、線型ポテンシャルと短距離で強くなるクーロン引力 ($\propto -1/r$) の和で良く表される。すなわち、クォークと反クォークから作られるメソン (中間子) は、このようなポテンシャルによる束縛問題の解として得られると考えるが良い。このポテンシャルを用いて計算されたメソンのスペクトルは、チャームやボトムなど QCD のエネルギースケール (~ 200 MeV) より質量の大きいクォークの系で良く実験値を再現している。

一方で、軽いクォークから作られたメソンやバリオンでは、カラー電場がクォーク対生成を起こして切れる効果や、カイラル対称性とその破れの影響のため、静的なポテンシャル描像ではスペクトルを完全には再現できない。とりわけ、軽いメソンやバリオンのクォーク構造、ハドロン間の相互作用における閉じ込め力の役割、4 個以上のクォークあるいはグルーオンを頭わに含むエキゾチックハドロンが存在するかどうかの問題と多クォーク系での閉じ込め力の関係、有限温度、有限密度における非閉じ込め相転移の仕組みなど、いまだに解明されていない多くの課題があり、これらは現在のハドロン物理の重要課題と位置づけられている。

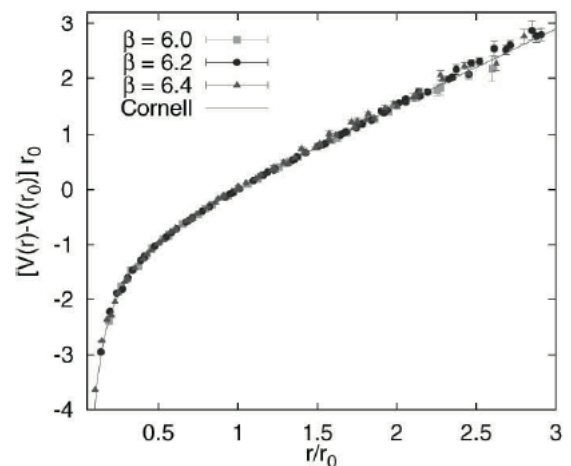


図 C.2.3: 格子 QCD 計算による (重い) クォーク間ポテンシャル (G.S. Bali, Phys. Rep. 343 1(2001)より転載)。

クォークやグルーオン (カラー) の閉じ込めは、格子 QCD による数値シミュレーションによ

ってほぼ確実であると考えられているが、その理論的な理解は必ずしも十分ではない。QCDの基本要素であるクォークやグルーオンが単独粒子として現れないことの解析的な意味やその証明は完全には行われていない。これは数理論理学の問題「Yang-Mills 理論におけるカラー閉じ込め（質量ギャップの存在）の証明」の問題として、ポアンカレ予想やリーマン予想などと共に、クレイ数学研究所が懸賞（100 万ドル）を付けた 21 世紀に残された数学の重要問題の 1 つとして未解決のままとなっている。