

格子 QCD シミュレーションによる

クォーク閉じ込め機構の研究

関戸 暢(金沢大学 大学院 自然科学研究科)

素粒子物理学とは物質は何からできているかという究極の疑問を解き明かすための物理である。物質の素つまり素粒子とはどのような性質を持ち、それらの間に働く力はどのような効果をもたらすのかを理解することを目指している。現在の素粒子物理学の主な枠組みとして標準模型が広く知られ、また正しいと信じられている。この模型において素粒子とはクォーク、レプトン、ヒッグス粒子、ゲージ粒子で、相互作用は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の3種類である。この標準模型は非常にうまく機能していて、これまでの高エネルギー実験の結果をよく再現する。

今回の発表ではクォークにスポットを当てる。クォークとは強い相互作用をする素粒子である。強い相互作用はクォークの持つカラー対称性 $SU(3)$ の理論で一般に QCD(量子色力学)と呼ばれている。このカラー対称性からくるゲージ場をグルーオンと言い、このゲージ粒子が強い相互作用を媒介する。この QCD には他の相互作用とは決定的に異なる性質がある。例えば電磁相互作用の理論である QED(量子電磁力学)では、その結合定数(相互作用の強さ)が小さいため結合定数で展開しての計算が有効であり摂動計算として知られている。ただし結合定数はエネルギースケールによっているので、摂動計算はあるエネルギースケールまでしか適用できない。QED の場合エネルギーが上がると結合定数も上がる。一方 QCD は強い相互作用というだけあって結合定数が大きい。これが原因で摂動展開が破綻してしまう。しかし QCD では高エネルギーになると結合定数が小さくなり摂動計算可能となる QED とはまったく逆の性質を持つ。この高エネルギー領域でのクォークの性質は漸近自由性として知られ、この事を指摘した物理学者はノーベル賞を得ている。直感的には漸近自由性とはクォークは近距離(高エネルギー)では自由粒子のように振舞うというものである。では実験で再現されうる低エネルギーではどうなっているかと言うと、摂動が破綻していることもありいまだ完全には理解されていない。特に興味深い問題であるクォークの閉じ込めはいまだ未解決問題である。実はクォークは現在その存在は誰もが疑わないものとなったが未だに実験では未発見のままなのである。実験で実際に観測される粒子はクォークの束縛状態であるハドロンだけである。このハドロンはクォークの持つカラーの対称性の元で不変な状態であり実験で観測可能な粒子はカラーシングレット(カラー変換不変)な粒子だけと言い換えることもできる。これがクォークの閉じ込め問題である。この問題の難解さはこの問題がクレイの 10 大問題の一つとして知られていることから明らかである。ここで問題を難解なものとしている原因は摂動計算が働かないことである。つまりなにか非摂動的な取り扱いをしなければこの問題にアプローチすることさえできない。その非摂動的な取り扱いの一つに格子場の理論が知られている。

経路積分量子化に従うとある物理量を計算するためには無限重積分を実行しなければならない。これは通常不可能なので摂動計算による近似的な計算があるのだが、格子場の理論ではこの無限重積分を有限重積分として評価すると言うものである。アイデアは単純で通常連続で無限に広がっている時空を格子状に分割し、かつ有限時空を考えると言うものである。このことにより通常摂動計算で現れる紫外赤外の発散は現れず性質のいい正則化として働く。さらに興味深いのは有限積分となったことで、実際に計算機計算によるシミュレーションが可能となることである。ただし実際には全ての積分を実行するのではなくモンテカルロ法を用いて物理量を評価する。この格子場の理論をもちいた計算機シミュレーションはさまざまな可能性を秘めているがここではクォークの閉じ込め解明を目的として実行する。

われわれの予想しているシナリオは超伝導におけるミスナー効果の類推である。それは電場と磁場を入れ替えたデュアルな系で、超伝導の場合の電子の対クーパーペアのデュアルな物として QCD 真空中には磁荷を持つモノポールが凝縮し、カラー電場はデュアル超伝導状態となった QCD 真空の中では広がることができずデュアルミスナー効果となる。この真空中にクォーク対を置くと電場はクーロン電場のように広がらず、クォーク間を一直線に伸びることになる。つまりポテンシャルの言葉で言うとクォーク間の距離に比例したエネルギー(ストリングテンション)を持つことになり、クォークの閉じ込めを示すことになる。しかし QCD にはモノポールは含まれていない。'tHooft は QCD にアーベリアン射影という部分的なゲージ固定を施すとモノポールの自由度が抜き出すことができ、このモノポールが凝縮することでデュアルミスナー効果が引き起こされるという考え方を提案した。格子シミュレーションでは'tHooft 流モノポールを格子で定義した DGT モノポールを用いた研究がおこなわれており、例えばストリングテンションなどの閉じ込めに関する物理量がモノポールからの奇与によって導けるというモノポールドミナンスが、MA ゲージと呼ばれる特定のゲージ固定を適応した場合のみ示されている。つまりデュアルミスナー効果での理解は正しそうではあるが、ゲージ依存の問題を残すものとなっている。

理研でのこれまでの研究はデュアルミスナー効果がゲージ固定に依存しない事を示すためのものである。我々はまず DGT モノポールをほとんど消してしまうような、ランダウゲージ固定においても変位磁流によってカラー電場が絞られることを示した。これは MA ゲージ固定(とそれに近いゲージ固定)以外で初めてデュアルミスナー効果を示した結果でありこの描像が正しいことを示唆するものである。

今回の発表ではこれらの結果と共に現在進めている研究の結果を発表する。それはユニタリゲージ固定の一種である F12 ゲージでの解析である。これまでユニタリゲージ固定はゲージ固定の中でも性質の悪いものとして知られていたが、実際はフラクチュエーションが原因であることがわかった。ノイズリダクションの方法として知られているマルチレベル法を用い精度を上げた計算をすると MA 同様ストリングテンションを再現することがわかったのである。これらの結果はゲージ依存問題の解決を示唆するものである。