

# 修士論文概要 (2017年度)

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室

# パリティ非保存電子散乱と核子形状因子

今井藍子

## 概要

電磁カレントおよび中性カレント、荷電カレントの形状因子から強く相互作用するクォーク、グルーオンの多体系である核子の構造が調べられる。核子電磁カレントの形状因子は陽子や重陽子の電子散乱実験から比較的良くわかっている。荷電カレントの形状因子はベータ崩壊などによって調べられてきた。一方で、中性カレントの形状因子は電磁カレントの形状因子ほどの精度では得られていない。しかし中性カレントは、それによってストレンジクォークの寄与を分離できる可能性があり、そのような意味で興味深い物理量である。

ストレンジ軸性ベクトル形状因子  $G_A^s$  の  $Q^2 = 0$  での値は核子スピンへのストレンジクォークの寄与  $\Delta s$  に対応している。この  $\Delta s$  は核子・ニュートリノ反応断面積に大きく寄与し、特に超新星爆発のシミュレーションにおいて良い精度の  $\Delta s$  が必要とされている。これまでストレンジ形状因子は偏極電子を用いたパリティ非保存電子散乱により実験的に調べられてきた。実験の例として SAMPLE では得られた非対称角度分布の係数の解析から様々な  $Q^2$  でのストレンジ形状因子が抽出されている。偏極電子の実験でベクトル形状因子は得られているが、軸性ベクトル形状因子についての情報はあまり得られていない。一方ニュートリノ・核子の中性カレント弾性散乱実験からは  $Q^2 > 0.45 \text{GeV}^2$  において比較的大きな  $G_A^s$  が報告されている。そこで  $Q^2 \sim 0$  における  $G_A^s$  の値を得る手法を開発することは重要である。

本研究では標的陽子偏極における電子・陽子弾性散乱を調べる。理論的に非対称角度分布の定式化を行い、ストレンジ形状因子に対する感度を考察した。電子偏極と異なる点の一つは、陽子の偏極方向の自由度が増えることにある。その結果、適当な陽子の偏極方向、電子散乱角を選ぶと非対称角度分布は  $G_A^s$  に非常に大きく依存することが判った。電子・偏極陽子弾性散乱は  $Q^2 \sim 0$  における  $G_A^s$  を得る有力な方法になりうると考えられる。

# クォーク・グルーオン・プラズマ中における 重いクォークの量子状態とその古典化

三浦崇寛

## 概要

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) は、2 兆度を超えるような物質で、クォークとグルーオンが閉じ込めから解放されている。現在では、RHIC や LHC という加速器を用いて、金や鉛といった重い原子核を衝突させて QGP を人工的に作るができる。QGP 生成のシグナルの一つに重いクォークコニウムの収量抑制があり、実験結果を読み解く上で、クォークコニウムの時間発展を記述することは大切である。

クォークコニウムは重いクォークとその反クォークの束縛状態であるが、そのポテンシャルモデルの一つに、量子開放系の枠組みでクォークコニウムと QGP の相互作用をノイズとして導入した確率論的ポテンシャルがあり、それは波動関数のデコヒーレンスを記述する。デコヒーレンスとは波動関数の離れた位置同士の相関が消えていくことである。確率論的ポテンシャルはエネルギー散逸の寄与を取り入れていないが、一方、クォークコニウムが熱平衡化するためには散逸を無視できない。そこで、散逸はクォークコニウムの QGP 中でのダイナミクスの中でどの程度の時間スケールで効くのか、そして、その時間スケールで、クォークコニウムは散逸を簡単に扱う古典的なランジュバン方程式で記述できるようになるのか、が問題となる。

本研究では、QGP 中の粒子との衝突によるデコヒーレンスにより、重クォークの波動関数は離れた位置同士の相関を消失すると、局在した波束のように振舞うことに着目する。この波束は、量子開放系で用いられているマスター方程式から導かれる非線形シュレーディンガー方程式を用いて記述される。具体的には、QGP 中で  $SU(N_c)$  自由度をもつ重クォーク 1 体で、 $N_c = 2$  と単純化した場合に、漸近的な波束について数値計算により解析した。そして、その波束の性質や、重クォークの質量やノイズ相関長の依存性を議論した。また、その波束がどの程度広がっているのかという点から、重クォークを古典的に扱うことの妥当性を議論する。

# QCD 臨界点の実験的探索に向けた 高次ゆらぎの時間発展の研究

村田大雅

## 概要

強い相互作用の基礎理論である QCD は有限温度・有限密度において相構造を持つことが知られている。特にハドロン相とクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相の間における一次相転移線およびその終点としての臨界点の存在が理論的に示唆されていることは、QCD の興味深い性質の一つである。一方で近年、欧米の大型加速器における重イオン衝突実験によって QGP の人工的生成が可能となり、活発な実験が行われている。その中でも特に、衝突によって生成される媒質の QCD 相図上の時間発展経路が衝突エネルギーに依存して異なるという特性を活かした実験的な QCD 臨界点探索は、重イオン衝突実験の最重要課題の 1 つである。

臨界点の実験的探索では観測量としてのゆらぎが注目されている。その理由はゆらぎが臨界点の近傍で特異的な振る舞いをすることにあり、特に臨界点に対してより敏感であるとされる高次ゆらぎも測定されていることは重イオン衝突実験の特徴の 1 つである。しかし系の時間発展が非平衡的であることや測定されるゆらぎはあくまでも終状態のものであることから、実験で測定されるゆらぎの解釈には注意が必要である。重イオン衝突実験のための臨界ゆらぎの時間発展の研究は過去にも行われているが、そこでは QCD 臨界点の重要な性質である秩序変数の保存電荷との結合が考慮されていなかった。最近になり、この結合を適切に取り入れた時間発展モデルが研究されたが、そこで用いられる定式化はガウスゆらぎのみを対象としており高次ゆらぎの時間発展の記述は不可能であった。そこで本研究では確率過程の方法を用いて保存電荷の高次ゆらぎの時間発展の定式化を行い、臨界点における結合や非平衡的発展の効果を含めた議論を行った。特にその時間発展を追うことで臨界点の存在がどのように反映されるかを見るとともに、臨界点の近傍・遠方を通過した場合で測定される終状態のゆらぎにどのような違いが生じるかを調べ臨界点のシグナルとしての有用性を議論する。

# 勾配流法を用いたクォーク・反クォーク系の エネルギー応力分布に対する格子数値解析

柳原良亮

## 概要

古典電磁気学によれば空間に正負の電荷が存在すると、電気力線は空間全体に広がり、その系には Coulomb ポテンシャルが形成される。一方で静的なクォーク・反クォーク対が存在する系では、カラー電磁場はフラックスチューブとよばれる 1 次元的なチューブに集約されると考えられている。フラックスチューブの存在は閉じ込めポテンシャルの形成を示唆し、これがクォーク閉じ込めの描像を与えている。

ソースが存在する系における場の分布は、応力という物理量からも捉えることができる。応力はソースによって誘発される系の応答を局所的な力として定式化したものである。したがって近接作用の立場から系を理解することが可能になるため、応力を用いた記述は非常に興味深い。古典電磁気学における応力は Maxwell 応力として知られ、力線に垂直な面には引力、平行な面には斥力がはたらく。本研究では、クォーク・反クォーク系のエネルギー応力分布を SU(3) Yang-Mills 理論に基づいた格子シミュレーションで探索する。

応力を表現する応力テンソルはエネルギー運動量テンソルの空間成分であるが、空間並進対称性が失われた格子上でエネルギー運動量テンソルを定義することは長年困難とされてきた。しかし近年考案された勾配流法という手法により、格子上におけるエネルギー運動量テンソルの定式化が可能になった。本研究では、この手法を用いてフラックスチューブ周辺の応力分布を、連続極限までとって定量的に解析し、フラックスチューブの形成および非可換ゲージ理論に特有な応力テンソルの性質を明らかにする。さらに何らかの閉じ込めモデルを用いた解析によって、格子シミュレーションで得られた結果に物理的な意味を与える可能性についても言及する。