

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名：西山 陽大

本論文は英文で書かれ、本文7章 (section) と5つの補章 (appendix) から構成される、150 ページに及ぶ力作である。第1章は序論で、この研究の動機となる実験的背景と理論的問題の設定、それに対するこの論文で展開する新しいアプローチの概観、そして論文の構成と残りの各章の簡単な要約が述べられている。第2章はこの論文で用いられる Kadanoff-Baym 方程式の経路積分法を用いた場の理論的導出方法が述べられ、その漸近解の一般的振る舞いとして、摂動論的取り扱いにおける「永年項問題」と、熱平衡の終状態が初期条件によらないで示すべき「普遍性」の問題が議論されている。この部分は先行研究のレビューである。第3章では、自己相互作用する実スカラー場の模型を使って Kadanoff-Baym 方程式による量子場の熱化過程が調べられる。最初に、長波長展開を用いて系の平衡系へのアプローチの指標となるエントロピー流を定義し、結合定数の冪展開の最低次でその相対論的時間発展が「H 定理」をみたす事が証明される。この「H 定理」の証明により、Kadanoff-Baym 方程式が非可逆な時間発展を記述できることを確かめた上で、この章の後半では、空間的に一様で運動量分布が非平衡の初期条件を与えてスカラー場の Kadanoff-Baym 方程式の時間発展の数値解が詳しく調べられている。第4章は $O(N)$ 対称性を持つ N 成分スカラー場に前章で行なった計算を拡張している。大きい N の場合に、 $1/N$ 展開の方法によって結合定数の冪展開の無限級数和をとり、 $1/N$ の最低次で「H 定理」を証明し、やはり空間1次元的な系の時間発展の数値計算を行なっている。第5章は有限温度のゲージ理論を概説し、次章で非平衡の問題に拡張する準備にあてている。第6章は、非平衡のゲージ理論への Kadanoff-Baym 理論の適用を行ない、ゲージ普遍性の問題の分析と、軸ゲージの下でのエントロピーの導出等の計算をおこなっている。第7章は全体のまとめと残された課題の整理にあてられ、5つの補章 (Appendices) では Kadanoff-Baym 方程式の導出に用いられた2粒子規約有効作用の計算、グルーオン偏極テンソルの計算、初期条件の設定で導入されたグリーン関数のソース積分核の役割、準粒子近似での衝突項の Kadanoff-Baym 方程式からの導出、そして熱平衡極限でのエントロピーの表式を求めている。

序論で述べられているように、2000年から米国 Brookhaven 研究所において RHIC(相対論的重イオンコライダー) をもちいて行なわれている核子あたり 100GeV の超高エネルギーでの原子核衝突実験で、強い異方的な集団流が観測され、相対論的な流体模型による数値シミュレーションでその再現に成功している。このことから反応によって生成された高エネルギー密度の物質が非常に短い時間で局所平衡となっていることを意味していると考えられている。これはパートン模型に摂動的 QCD を適用した模型の予測に反し、グルーオン場の熱化過程に古典的な

希薄気体のボルツマン方程式を用いることの限界を示唆している。この困難を克服するため、本研究で著者は、量子場の熱化過程に量子論的な非平衡過程を記述する Kadanoff-Baym 理論を用いることを提唱し、スカラー場の ϕ^4 模型、 $O(N)$ 模型、そして $SU(N)$ 非可換ゲージ模型にたいして、数値シミュレーションを含め Kadanoff-Baym 方程式を導出して、その解の時間発展を詳細に調べている。

Kadanoff-Baym 理論を用いるメリットは、ボルツマン方程式の衝突項の導出に取り入れられていないメモリー効果や、パートンの時空伝播におけるオフシェル効果などが自動的に取り入れられる点である。特に後者の効果を見捨てる、空間 1 次元の場合には衝突前後でのエネルギー・運動量の保存則から運動量分布が時間変化しない、すなわち運動量分布の緩和が起こらないため、1 次元系で Kadanoff-Baym 方程式が量子場の熱化を記述できるかどうかというのはたいへん興味ある原理的な問題である。

著者は、まずスカラー場の ϕ^4 模型を用いて量子場の 2 点相関関数に対する Kadanoff-Baym 方程式を導出し、その物理的意味を長波長近似で考察している。Kadanoff-Baym 方程式は、素励起のスペクトル関数を定める式と、その統計的分布の時間発展を決める式の連立方程式からなっている。著者はこの式が熱平衡への非可逆過程を記述することを確認するために、長波長近似を用いて、「H 定理」を満たすエントロピー流の導出を行なっている。同様なエントロピーの表式は、非相対論的な場合に知られていたが、相対論的な場の量子論に拡張したのはこの著者が初めてである。更に、著者は Kadanoff-Baym 方程式の数値解を求め、空間が一様な系に対し、運動量分布の 2 つの異なる初期条件から出発して、それがどちらの場合も急速に熱平衡分布に近づくことを示し、それから著者の導入したエントロピーの時間発展を分析している。この結果は、 $O(N)$ 対称性をもつ N 成分スカラー場模型に拡張され、 $1/N$ 展開法により、結合定数の高次の項を幾何級数和として取り込んだ計算も行なって、「H 定理」の証明とエントロピーの表式の導出、そして数値解の計算をしている。更に著者は、本来の目的であった非可換ゲージ場の熱化過程の記述への拡張を試み、時間的軸性ゲージ ($A_0 = 0$) で H 定理の計算を試み、この方法の問題点をいくつか指摘している。

これまで、スカラー場模型に対して Kadanoff-Baym 方程式を導出しその数値解の求めた研究はあったが、非平衡状態でのエントロピーの導出やその「H 定理」の証明を行なったのはこの著者のオリジナルな成果であり、この部分は既にこの分野では権威ある Nuclear Physics A 誌に著者の単名論文として発表されている。

このようにこの博士論文で著者は、量子場の非平衡時間発展を Kadanoff-Baym 理論を用いて記述し、非平衡状態を記述するエントロピーの表式を求め、数値計算によって量子場の運動量分布が平衡分布へ緩和する過程を、新しい視点から詳細に分析している。この研究成果は、超高エネルギー原子核衝突における初期過程の理論的理解にむけた重要な一歩であり、これからの研究の発展が期待される。本論文は、博士号を授与するのに十分な内容であると審査員一致で判定した。