

論文審査の結果の要旨

氏名 中村壮伸

非平衡条件下にある系の性質をその構成要素の統計的性質によって記述しようとする非平衡統計力学は、線形応答理論が成立する状態をのぞいて確立していない。線形応答理論が適用できない系に関しては、興味ある物理現象を絞り、その現象の理解をめざして、各論としての統計力学的方法が開拓されてきた。その一方、近年、数学的に単純な模型の研究を介して、線形応答領域を超えた非平衡状態の重率に関して、共通の規則によって特徴づけられるクラスが存在することが明らかになってきた。例えば、拡張された熱力学関数が存在するクラスでは、その揺らぎはアインシュタイン関係式の拡張で表現される。しかし、この定理においては、保存場の長距離相関がもたらす相加性の破れの影響は巧みに除外されている。他方、補助場の導入によって長距離相関を表現することにより、相加性を保持した重率の表現が得られるクラスもある。

このような状況において、実験的に実現可能な系に対して、普遍的な規則を見出すことを目標にしつつ、系の個別的な性質を明らかにしていくことは重要である。提出された中村壮伸氏の論文は、この課題に挑んで得た成果がまとめられている。

本論文は 5 章 89 ページからなる。第 1 章で、非平衡系研究における本論文の位置づけが議論され、とくに、研究される対象について述べられる。第 2 章では、長距離相関の長時間相関への影響が現象論的な方程式をもちいて調べられる。第 3 章は、構成要素の動力学が明示され、理論的に解析される方程式が導出される。第 4 章は、その方程式の解の長距離の振る舞いが議論され、長距離相関のあらわれかたが明らかにされる。第 5 章では、同じ系に対して、拡張されたアインシュタイン関係式の数値的検証が試みられる。

本論文で考察されるのは、外場で駆動されたコロイド分散系であり、レーザートラップを使うことにより、実験系としても構築できる。また、そのパラメータの調節によって、線形応答領域から有意にはずれた非平衡定常状態を実現することができる。そして、カレント揺らぎだけでなく、密度揺らぎの性質が直接測定される。これらの利点により、非平衡系の基礎的問題を論じるための典型的な系になりえる可能性がある。論文では、とくに簡単な状況として、空間的な周期ポテンシャルと空間的に一定の外力が外場として与えられる場合が議論される。実験が実際に行われる前に、理論的にこの系について調べることは重要である。

コロイド分散系に対する動力学モデルとして、コロイド粒子の配置の時間変化を記述する多体ランジュバン方程式がある。このモデルの妥当性は、その状況依存性まで含めてある程度まで調べられており、論文で考えたい状況ではよい出発点になっている。そこで、非平衡多体ランジュバン方程式の統計的性質を求めるのが問題になる。

具体的には、周期ポテンシャルの周期より長いスケールでの密度揺らぎを求めるために、分布関数の従う確率的時間発展方程式に対して、摂動的系縮約の方法が適用される。ただし、この計算を正しく実行するためには、いくつかの注意が必要である。第一に、粒子間相互作用がない場合には長距離相関が生じない、と物理的に予想されるので、これを理論的に示さなければならない。しかし、この物理的に自明なことが、素朴に計算した表現では明示的になっていない。本論文では、いくつかの恒等式をうまく利用しながら、この性質が示される。

この結果を踏まえると、粒子間相互作用の強さに関する摂動展開を実行することが可能になる。従来の非平衡状態の研究では、平衡状態からの摂動展開を考えるのが常套手段であった。それに対し、まず、詳細つりあいを大きく破った非平衡状態の長距離の振る舞いに焦点をあて、ついで、相互作用がない状態を未摂動状態に選ぶことによって、今まで具体的に計算されていなかった非自明なことが計算できることになった。物理的には、粒子間相互作用の特徴的長さ λ と周期ポテンシャルの周期 Λ の大小関係によって、長距離相関のあらわれかたが質的に異なることを明示的に示した結果が重要であろう。これは、構成要素の動力学に立ちかえった議論でない λ と Λ の得ることができないものであり、今までの研究では明らかにされえなかった点である。

さらに、このようにして計算された密度揺らぎの熱力学部分は、既にある外場とは別のローブ外場に対する線形応答と、拡張されたアインシュタイン関係式によって結ばれる、とする理論的予想がある。第5章の数値実験の結果は、この予想の成立を示唆している。

以上のように、中村氏はその論文において、外力によって駆動されたコロイド分散系の統計的性質を明らかにした。堅実な設定に対する着実な計算にもとづく明晰な結果であり、実験が具体的に行われる際には、その結果はさらに有効になるだろう。ただし、現時点では、普遍的な規則を見出す目標には到達していない。第5章の数値実験に対応する理論的考察は可能であろうし、より野心的には、長距離相関の寄与と熱力学部分の寄与を統一的に記述する可能性を模索する研究もありえるだろう。これらは今後の課題であり、さらなる発展が期待される。このように、本論文は、非平衡統計力学に対して重要な貢献をもたらすものだと位置づけることができる。

なお、本論文の内容は、第2章、第3章、第4章が2編の論文として出版されており、第5章が投稿準備中である。

以上の点から本論文は博士(学術)の学位を与えるのにふさわしい内容であると審査委員会は全員一致で判定した。