

論文の内容の要旨

論文題目 Statistical Mechanics and Dynamics in Long-Range Interacting Systems

(長距離相互作用系における統計力学と動力学)

氏名 森 貴司

長距離相互作用系、より一般に非加法的な系、における平衡統計力学、及び多体ダイナミクスについて研究する。長距離相互作用系の理解は短距離相互作用系にくらべて遅れている。例えば、これらの系に平衡統計力学の枠組みを適用できるかどうかという基本的な問題も完全に理解されているとは言い難い状況にある。そこで本学位論文では、まず統計物理学の基本的概念について再考する。長距離相互作用系であっても、平衡状態自体は等重率の原理に基礎をおいた平衡統計力学で記述されることがここで論じられる。それゆえ、平衡状態を調べる際には平衡統計力学の枠組みはそのままの形で長距離相互作用系にも適用される。しかし、統計力学を適用することで予言される諸性質は短距離相互作用系のもものと著しく異なる。それは、長距離相互作用系に加法性という基本的な性質が備わっていないためであることが論じられる。実際、先行研究によって、様々なタイプの無限レンジ模型（すべての粒子、もしくはスピンの距離に依らず等しく相互作用し合うモデル）が研究され、それらの模型が平衡状態、非平衡ダイナミクスの両方で異常な性質を示すことが明らかにされてきた。例えば、負の比熱、アンサンブルの非等価性、および準定常状態の存在が挙げられる。無限レンジ模型は熱力学的極限で平均場理論が厳密となり、それゆえ解析的にも数値的にも扱いやすい利点がある。そのため統計力学的な観点からは、これまで主に無限レンジ模型が詳しく調べられてきた。無限レンジ模型の予言する結果は、少なくとも定性的にはより一般の長距離相互作用系でも正しいだろうと期待されるが、実際に、無限レンジ模型の結果が一般性を持ったものなのかを明らかにすることは未解決問題であった。本学位論文では、平均場理論と一般的な長距離相互作用系との関係を詳しく吟味することによってこの問題に取り組む。初めに、平均場理論の結果がある長距離相互作用系の平衡状態の性質をどの程度正しく再現するかを調べる。その結果、パラメータ空間が平均場相と非平均場相に分かれることが明らかとなる。平均場相では平均場理論が厳密に正しい。したがって平均場理論は多くの場合、長距離相互作用系の平衡状態の性質を定量的に正しく予言することがわかる。一方非平均場相で

は平均場理論はもはや正しい記述を与えない。したがって、一般の長距離相互作用系では、平均場理論だけで系の性質を完全に正しく記述することはできないことになる。次に、光共振器中の原子集団からなる系のダイナミクスを調べ、平均場ダイナミクスが厳密に正しい結果を与えるかどうかを研究する。ここで、系は時間依存する駆動外場がかかっているにもかかわらず、またいくつかの環境系と相互作用しているもよい。そのような一般的な設定で、平均場ダイナミクスが実際に厳密に正しい結果を与えることが証明される。最後に、負の比熱やアンサンブルの非等価性のような異常性に、長距離相互作用が必要かどうかを問う。これらの異常性は系の非加法性に由来する。したがって、もし短距離相互作用系で非加法的な系があれば、長距離相互作用系と似た振る舞いを示すはずである。そのようなモデルが実際存在することを指摘する。そのモデルは弾性スピンモデルと呼ばれ、スピントロニクス物質の研究で導入されたモデルである。そのモデルの平衡状態の性質が詳しく調べられ、その結果、このモデルが実際に長距離相互作用系と定量的にも極めて近い振る舞いを示すことが示される。これによって、長距離相互作用系の統計力学はあるクラスの短距離相互作用系に対しても有効であることがわかる。本学位論文で研究される系は純粋に理論的な興味によるものではなく、スピントロニクス系や光共振器中の物質など、現実の物理系にも有効であり、したがって本研究はこれらの系の研究に対して基本的な基盤を与える。