

## ・研究成果

根本 幸児:

### 複数の感染源が引き起こす感染症の爆発的広がり

我々はレギュラーランダムグラフ上で susceptible-weakened-infected-removed(SWIR)感染モデルの有限シード(初期感染者)比率からの振る舞いについて調べた。モンテカルロシミュレーションと approximate master equation(AME)の数値計算の計算からこのモデルでは二つの臨界感染率が存在することが明らかになった。最初はRノードクラスターのパーコレーション転移であり、二番目はそのクラスターサイズのとびによる一次転移である。AMEの結果によりこのような転移はネットワークの次数が大きいかつシード比率が小さいときに出現することがわかった。

### ネットワーク上の感染症における隔離対策の効果

我々はレギュラーランダムグラフと無相関スケールフリーネットワーク上の susceptible-infected-removed(SIR)モデルを用いて隔離対策がどの程度有効を調べた。ここでの隔離対策は感染者が発生したときある確率  $f$  でその感染者と隣接する感染者をネットワークから切り離すというものである。モンテカルロシミュレーションによりこの対策は事前にワクチンをランダムに配布する対策に比べて優位性を持つことがわかった。また SIR モデルに対し解析的に臨界感染率を導出し理論的にもその優位性を示すことができた。とくに、常に大流行が起こる fat-tailed なスケールフリーネットワークにおいてもわずかに  $f$  の値が入るだけである程度大流行を防ぐことが可能であることが明らかになった。また、実際のネットワーク上でもその優位性を示唆する数値的結果も得ることができた。

北 孝文:

### 拡張準古典方程式を用いた超伝導体の帯電効果

超伝導体に働くローレンツ力とそれが引き起こすホール効果に関しては、これまで、ほとんど理論研究が行われてこなかった。その主な理由として、磁場中の超伝導体を記述するのに標準的に用いられる「ギンツブルグ-ランダウ(GL)方程式」や「準古典アイレンバーガー方程式」において、ローレンツ力が欠落していることが挙げられる。準古典方程式は、ゲージ不変性を適切に考慮することで、ローレンツ力を含むように拡張することが可能である。この拡張準古典方程式を、マイスナー状態、孤立量子渦(量子磁束)および磁束格子状態に適用して、その電荷・電場分布を理論的に調べた。これらの状態では、いずれも超伝導電流が磁場を伴って流れており、ローレンツ力による新たな効果が期待できる。計算の結果、マイスナー状態の表面付近や量子渦の渦芯に電荷が蓄積し、「ホール電場」が生じることが明らかになった。このホール電場の大きさと方向は、フェルミ面とエネルギーギャップの異方性に強く依存し、温度や磁場によって大きく変化する場合があることも分かった。

### ボーズ-アインシュタイン凝縮相における基底状態波動関数と素励起の研究

ボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)相において、個別励起と集団励起が全く別物であることを、数

値的研究により明らかにした。広く知られたガボレー-ノジュール理論(1965年)によると、BEC相における個別励起と集団励起は、同じ密度揺らぎであり、弱い相互作用の極限でボゴリユボフ・モードに一致し、また、強結合領域では超流動4Heで観測されるフォノン-ロトン曲線に移行する。今回得られた結果は、この通説を覆すものであり、ボーズ・アインシュタイン凝縮の基礎理論に変革を迫る重要な結果である。より具体的には、一粒子励起と二粒子励起のスペクトル関数の幅を、拡散モンテカルロ法により評価し、異なる振る舞いを持つことを確かめた。また、弱く相互作用するBEC相の基底状態に対して、新たな変分波動関数を構成し、この系が、本質的に(平均場近似では記述できない)多体系である事を明らかにした。

#### カノニカル分布による量子理想気体の二粒子相関の理論的研究

量子理想気体の統計力学は、通常、グランドカノニカル分布を用いて行われる。しかし、グランドカノニカル分布は、ボーズ・アインシュタイン凝縮相において、非物理的な「巨大粒子数揺らぎ」を予言し、二粒子相関を正しく記述できないことが知られてきた。そこで、カノニカル分布で縮約された密度行列を計算する新たな公式を見出し、それを用いて一様系の二粒子相関を計算することに初めて成功した。この結果は、今後における「量子モンテカルロ計算」等の数値計算結果を検証する基礎ともなると考えられる。

奥田 浩司:

#### 有限時間熱機関の研究

非平衡現象の理論的研究として、有限時間熱機関の研究をおこなった。

昨今、地球温暖化は世界的な問題となっている。より効率の良い熱機関を開発することは、この問題の解決に貢献するだろう。また、最近の原子力発電の安全性に対する疑問から、代替エネルギーへの要求が増しているが、その候補の1つである地熱発電は原理的には熱機関と考えることができるであろう。物理学では、熱機関の効率は熱力学の基本的課題として古くから扱われてきた。特に重要な結果は、熱機関の効率の上限を与えるCarnot 効率  $\eta_c = 1 - T_c/T_h$  ( $T_c$ : 低温熱源の温度,  $T_h$ : 高温熱源の温度)の発見である。通常Carnot 効率が実現されるのは、準静的極限の場合だけである。しかし、準静的熱機関は無限の時間をかけて有限の仕事を取り出すという点で、仕事率が0であり、現実的な熱機関としては役に立たない。現実の熱機関は、有限時間で動作することで効率を犠牲にする代わりに有限の仕事率を得ている。そこで、準静的でない有限時間で動作する熱機関の性質を調べることは熱力学の重要な課題であると思われる。有限時間熱機関の過去の研究において、Curzon and Ahlborn(1975) がCarnot サイクルを有限時間に拡張し、Carnot サイクルの仕事率が最大となるときにはその効率が  $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_c/T_h}$  となることを比較的一般的な条件のもとで導いたことは特に重要な成果である。

この研究では、名古屋大学の泉田氏と共に、局所平衡仮定を満たしている有限時間熱機関を理論的に解析した。具体的には、ピストンと熱壁をもつ2次元容器中に入れた多数の剛体円板粒子を作業物質とした Carnot サイクルを構築し、ピストンが有限速度で動いているときのこのモデ

ルの効率等を分子運動論と数値シミュレーションを用いて計算した。その結果、局所平衡を満たしている状況では温度や密度は一様になるが、粒子の速度分布は単純な Maxwell 分布にはならず、ピストンの速度に依存した速度分布を使用する必要があることが分かった。さらに、このサイクルは Curzon and Ahlborn が用いた有限時間 Carnot サイクルを忠実に再現しているにもかかわらず、その最大仕事率時の効率は、 $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{T_c/T_h}$  からずれていることが分かった。

#### 非局所結合振動子系のキメラ状態の研究

単純な動力学系がたくさん集合した系では、その間の相互作用によりマクロに複雑な動的現象がしばしば現れる。それを理解するための重要なキーワードが同期現象であり、同期現象の理論的研究に最もよく用いられる基本的モデルが結合振動子系である。

この研究は、D1学生の須田君と共におこない、結合振動子系に現れる複雑な時空パターンに着目した。具体的には、1次元上に並んだ同一振動数の振動子が一定範囲内の他の振動子と相互作用している非局所結合振動子系に現れるキメラ状態を扱った。キメラ状態は、元は全て同一の振動子である系に、振動子が同期しているcoherent領域と同期していないincoherent領域が共存している状態で、特にincoherent 領域では、振動子の平均振動数が連続的に変化し、位相が至る所不連続になる奇妙な状態である。キメラ状態は発見から十数年経っているにもかかわらず、力学系としての明確な特徴付けができておらず、最近でも活発に研究が行われている。この研究では、複数の coherent 領域、incoherent 領域が共存しているマルチキメラ状態に着目し、マルチキメラ状態のオーダーパラメータが定常ではなく振動している場合があることを発見した。また、この振動の原因を明らかにするため、マルチキメラ状態の安定性解析をおこない、平均場解析と数値計算を組み合わせ、安定性の固有値を計算した。

速水 賢:

#### フラストレート磁性体におけるスキルミオン結晶の研究

2009年に空間反転対称性をもたないB20系合金で観測されたスキルミオンは、そのトポロジカルに堅牢な性質から、スピントロニクスといった次世代の電子デバイス候補として大きな注目を集めている。こうしたスキルミオンの発現にはスピン軌道相互作用に由来したジャロシンスキー・守谷相互作用が重要な役割を担っているが、一方で近年、その枠を超えた新たなスキルミオン結晶が見出されてきている。そこで本研究では、新しい安定化機構をもつスキルミオン結晶を得るために、フラストレートした相互作用をもつ磁性体に対して、モンテカルロ・シミュレーションを用いた解析を行った。特にスピン軌道相互作用が無い磁性体において、容易軸異方性がスキルミオンの発現に重要な役割を担っていることを明らかにした。今回得られたスキルミオンは、従来のスピン軌道相互作用由来のスキルミオンとは異なり、渦巻数という新しい自由度が存在するため、スキルミオンが示す物性の更なる開拓が期待される。