

## 変革を駆動する先端物理・数学プログラム (FoPM)

## 国外連携機関長期研修 報告書

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| 氏 名  | 北 浜 駿 太                                  |
| 所属部局 | 理学系 研究科 物理学 専攻                           |
| 受入先  | Leonardo Mazza (Paris-Saclay university) |
| 日程   | 西暦 2024 年 9 月 1 日 ~ 西暦 2024 年 9 月 21 日   |

本研修では、Paris-Saclay大学に3週間滞在し、Leonardo Mazza先生のもとで、運動量の2乗に依存する2体相互作用のある1次元カイラルフェルミオン系に関する研究を行った。このような系を記述する密度演算子の満たす運動方程式は、KdV方程式と呼ばれる可積分な方程式の量子版となることが知られており、量子KdV方程式と呼ばれている。古典のKdV方程式は非線形でありながら、ソリトンと呼ばれる孤立波解を持つことが知られている。研修の第一の目的は、量子KdV方程式に関してソリトンに対応する量子的な状態を構成することである。本研究で興味を持っているのは相互作用が運動量の2乗に比例する場合であるが、他の物理的には自然ではないような相互作用の場合においては、量子多体scar状態と呼ばれる高エネルギー低エンタングルメントを持つ状態が存在することが先行研究によって明らかになっている。第二の目的は、相互作用が物理的に自然な運動量の2乗に依存する場合において量子多体scar状態を見つけることである。

ソリトンに関しては、まず摂動論の観点からソリトンのような状態が存在する範囲を絞った。古典ソリトンのエネルギーは運動量の $5/3$ 乗に比例することが知られており、これはエネルギー固有値の上限の振る舞いと一致することから、ソリトン状態は最高エネルギー状態付近に存在すると考えられる。相互作用の弱い極限と強い極限における摂動論を考えることにより、最高エネルギー状態は相互作用の弱い極限では運動量の2乗に比例し、相互作用の強い極限では運動量の1乗に比例することが示される。このことから、エネルギーが運動量の $5/3$ 乗に比例するソリトン状態は相互作用が中間的な領域に存在すると考えられる。実際、様々な相互作用パラメータに関して全運動量 $P$ を変化させて最高固有エネルギーを計算すると、あるパラメータ領域では十分大きな $P$ に関して $5/3$ 乗の振る舞いが確認できた。

また、ソリトン状態の別の候補として、共同研究者のAlbertoはコヒーレント状態を提案している。コヒーレント状態の各全運動量セクターへの射影を取り、各固有状態とのオーバーラップを計算すると、最高エネルギー状態と大きいオーバーラップを持つことが明らかになった。このことから、コヒーレント状態がソリトンに近い性質を持つ可能性があると考えられる。

量子多体scar状態に関しては、まず、真の意味でのscarではなく、相互作用を強めていくにつれて多数の固有状態がフェルミオンのような状態からボゾンのような状態に遷移していく過程でフェルミオンのような状態を保ち続けるという意味でのスカー的な状態を調べた。そのための指標として、Inverse participation ratio(IPR)と呼ばれる指標を計算した。その結果、相互作用が運動量の2乗に比例する場合においても、多数の状態がフェルミオンのような状態である中でボゾンのような状態、あるいは逆に多数の状態がボゾンのような状態である中でフェルミオンのような状態が存在することがわかった。

しかし、IPRを用いた解析は真の意味でのスカーを意味しないという問題点がある。ある状態が真の意味でスカーであると主張するには、エンタングルメントエントロピーを計算して、高エネルギー低エンタングルメントをもつ非典型的な状態を示す必要がある。今後の展望としては、スカー状態の指標としてエンタングルメントエントロピーを計算することである。また、準位統計や粒子数密度の観点から可積分性について調べることも方向性の一つである。

