

A02 冷却原子を用いた非平衡孤立量子系の制御と前期熱化の研究

京都大学大学院理学研究科 高須洋介

京都大学大学院理学研究科 高橋義朗

孤立量子系における熱平衡化の問題は、量子統計力学の基礎にかかわる最重要問題の一つとして、非常に注目を集めている研究テーマであり、主に理論的側面から国内外で活発に議論されてきた。一方、孤立した量子多体系というものは、対応する実験系が存在しなかったため、極限まで理想化した思考実験の対象物であった。計算技術が発達した現代にあっても、量子多体系の非平衡ダイナミクスの研究は数値計算によるシミュレーションが困難な問題の一つとして知られており、様々な挑戦が続けられている。

近年、レーザー冷却された原子集団が孤立量子多体系として注目を集めている。レーザー冷却法および蒸発冷却法により、 10^5 個程度のマクロな数の原子集団を量子縮退近傍までに冷却させることが可能である。原子集団は、超高真空中にレーザー光により閉じ込められていて、外界とは直接接触しておらず、まさに、「マクロで理想的な孤立量子多体系」が実現されている。また、冷却原子系では、実験の各種パラメーターの自由度が大きく、空間・時間の様々なパラメーターを様々に変化させることで、興味ある量子系を様々に模倣することが可能である。また、量子多体系が時々刻々と変化する様子を直接的に観測することも可能である。このような量子シミュレーションと呼ばれる研究テーマが実験面・理論面の両面から大きな興味を集めている。

本研究では、冷却原子を用いて、量子非平衡系を構築することを目的として開始した。空間の次元性や、さらには原子同位体を変えることにより、可積分系、またはそれに近い系を構築して、量子状態の制御と前期熱化的な振舞いの観測を目指して実験的研究を行っている。具体的な研究対象として、光格子中に捕獲されたボース原子 ^{174}Yb を用いて、光格子深さを急激に減少させた（クエンチ）後の時間発展ダイナミクス、および基底状態 ^{173}Yb 原子の核スピン由来の $\text{SU}(6)$ 対称性とその動的制御によるスピンの時間発展ダイナミクスの両方を対象として研究を行っている。

平成 28 年度の成果としては、我々が中心となって発案・実行した冷却原子気体の運動エネルギー・相互作用エネルギーの直接測定がある (1)。光格子中のボース原子は、ボースハバード方程式

$$\hat{H} = -t \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_j + \frac{U}{2} \sum_i \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_i \hat{a}_i + \sum_i (\mu - V_i) \hat{a}_i^\dagger \hat{a}_i$$

に従うことが知られている。ここで、第一項はサイト間のホッピングを表す運動項、第二項は同一サイトにある複数原子による相互作用項、第三項は原子の閉じ込めのトラップポテンシャル項である。

ボース凝縮まで冷却された ^{174}Yb 原子を光格子に断熱的に導入し、モット絶縁体状態を初期状態として用意する。光格子の深さを急激に下げ（クエンチ）、その後光格子の深さを一定に保つ。その深さは、十分冷却された原子団であれば超流動状態が発現する深さとする。系は徐々にモット状態から超流動状態に変化していく。飛行時間計測法による原子の擬運動量分布の観測から原子団の運動エネルギーを測定した。さらに、我々の開発した技術である、原子団の超高分解能分光法により、相互作用エネルギーのアンサンブル平均を測定した。その結果、相互作用エネルギーが増大し、運動エネルギーが減少し、原子のホッピング時間程度

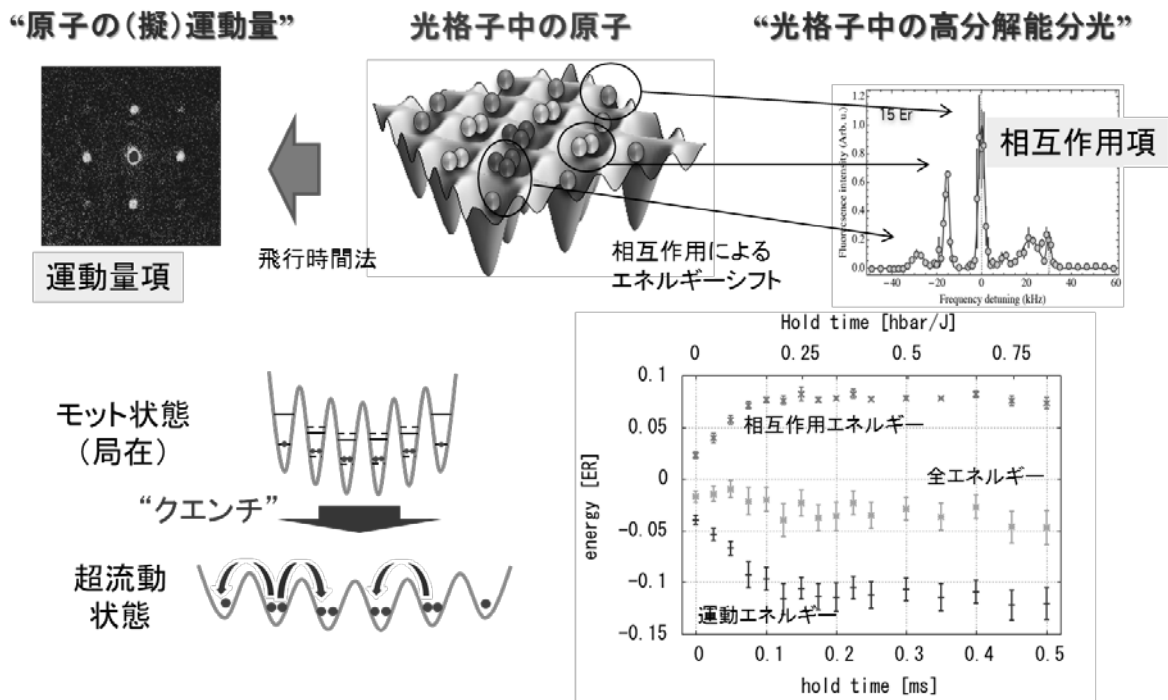


図1. モット状態から超流動状態へのクエンチ後の運動エネルギーと相互作用エネルギーの時間発展

での運動エネルギー・相互作用エネルギーの再分配を観測することができた。特に原子集団の拡がりがないとみなせる時間領域の場合には運動エネルギー、相互作用エネルギーのアンサンブル平均の和から系の全エネルギーを計算することができ、その和は時間によらず一定であった。これは孤立量子多体系であるため、エネルギー保存則の反映による結果である。同時に我々の新規に開発した、原子団の運動エネルギー、相互作用エネルギーのアンサンブル平均の測定方法の妥当性を検証していると考えている。冷却原子系以外での量子系と比較しても、このような孤立量子多体系で、運動エネルギー、相互作用エネルギーを別個に測定することが出来たのは我々の把握する限りではなく、意義高い結果であると自負している。

これまでにクエンチ後の光格子ポテンシャルの深さや光格子の次元性などを制御することで、振舞いがどのように変化するかを明らかにする研究を行った。また、この我々が観測した物理、特にホッピング時間程度での速い緩和と、それ以降の定常状態については、理論的な議論・理解が必要であると考えている。このため、物性物理、統計物理などの様々な理論研究者と密にディスカッションを行っている。今後は、我々が初めて確立した運動エネルギー・相互作用エネルギーの直接測定を通して、非平衡ダイナミクスや前期熱化の観測に向けた研究を進めていきたいと考えている。また、光格子のクエンチ以外の操作によるダイナミクスの観測も検討中であり、いくつかは既に予備的実験を開始している。

^{173}Yb 原子の核スピン由来の $\text{SU}(6)$ 対称性とその動的制御によるスピンの時間発展ダイナミクスについては、我々は予備的実験を行った。さらに台湾 Tsing Hua 大学の M. Cazalilla 教授と共同で主に理論的な面からの研究が進行中である。

参考文献：

- (1) Y. Takasu et al, 投稿準備中