

## 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、光格子中にボソンである  $^{174}\text{Yb}$  原子を断熱的に導入し、モット絶縁体状態を初期状態として用意する。その後、光格子の深さを急激に下げた(クエンチ)後の系のダイナミクスを対象として研究を行った。

平成 28, 29 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、および運動量項、相互作用項の熱力学量であるアンサンブル平均を実験的に直接観測を通した非平衡ダイナミクスの研究がある(1)。光格子中のボース原子は、ボースハバードハミルトニアン

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

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  $^{174}\text{Yb}$  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。系は徐々にモット状態から変化していく。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や光会合法により、相互作用エネルギーのアンサンブル平均を測定し

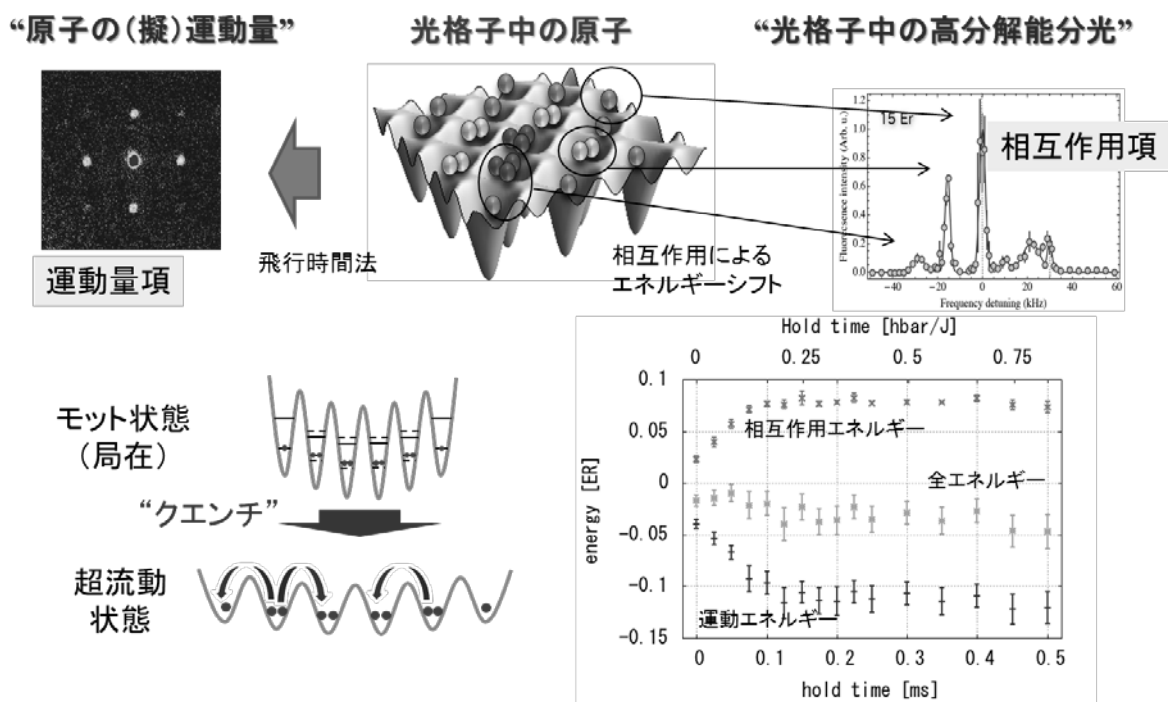


図1. モット状態から超流動状態へのクエンチ後の運動エネルギーと相互作用エネルギーの時間発展 (3次元の場合)

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。

また、飛行時間法による画像から非局所的な原子間相関のアンサンブル平均を求める方法を独自に開発し、クエンチ後の時間発展を観測した。モット相からモット相へのクエンチにおいて、1次元系および2次元系において非局所原子間相関はクエンチ後にある一定速度で弾道的に広がっていくことを見出した。

さらに、これらのエネルギー、および非局所的相関の時間発展は、共同研究者らによる数値計算結果と定量的によく一致しており、我々の実験系がまさに量子シミュレーターとしても有用であることを示すことができた。

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、および非局所的相関の時間発展を直接観測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。今後は、可積分系である1次元フェルミハバード系などへの応用も行っていきたいと考えている。

参考文献：

- (1) Y. Takasu et al, 投稿準備中