

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

「光格子を利用したアトムロニクスのためのデバイス開発」

### 2. 研究者

木下 俊哉

### 3. 研究のねらい

情報の媒体として冷却原子を利用する新技術の開発が期待されている。冷却された原子は波として振る舞うので、原子波の位相に物理量を含む情報を載せ、原子波どうしを干渉させて位相差を検出し、従来にはないほどの精度で例えば重力加速度などの物理量が測定できる。量子計算や量子情報の場合は、原子の内部状態どうしを絡み合わせその中に情報を担わせかつ処理する。どちらの場合も、単一原子や多数の原子集団の動きや流れをいかに操作するか、物質波の輸送に最適な環境をいかに作り出すか、がかなめとなる重要な技術である。しかしながら、固体デバイスでの電子の制御と違って、冷却原子の輸送に関する制御技術は確立しておらず、輸送や流れに関する現象の研究すら十分に行われていない。本研究の目的は、将来、原子の動きを制御する機能をもつデバイスを光格子内に作り出すための基盤となる、光格子中の冷却原子の流れや輸送に関する物理を探求することである。当初の計画では、2次元光格子によって形成された1次元チューブ内のボース気体のダイナミクス、内部自由度をもったボース＝アインシュタイン凝縮(スピノール BEC)でのジョセフソン振動のセルフトラッピング現象およびそれを利用した原子のトランジスタ作用の観測に着目して研究にとりくんだ。

### 4. 研究成果

(1) 1次元ボース気体の非平衡ダイナミクス(ペンシルベニア州立大学滞在中および帰国後)

2次元光格子によって形成された1次元チューブは、欠陥などを含まない極めてクリーンな物質波の導波路となる。閉じた導波路内を伝搬させる干渉計では、干渉後に冷却原子を一旦回収しすぐに再利用できるので、実用的にもより優れた干渉計となりうる。また、接触型相互作用を行う1次元ボース気体は可積分系であり、初期の運動量分布は散逸することなく持続的に保存される。この散逸がおこらないという特質は、1次元導波型原子波干渉計など原子波を利用した超精密なセンサーの開発には本来非常に適したものである。しかし、この特質は現実の物質で作った1次元系において、どのような場合でも本当に正しいと言えるのかは自明ではない。また、2重井戸(あるいは2つの1次元チューブ)による量子気体の分裂および両チューブ間のトンネリングなどは、実際に干渉や輸送を行う際には重要なツールになるが、トンネリング自体は系の可積分性を崩してしまう。そこで、可積分性が破れた1次元ボソン系で散逸が起こるのかどうかを調べるため、1次元ボース気体にはじめ熱的に非平衡な運動量分布を与え、時間の経過とともに運動量分布がどのような変化を示すか詳細に調べた。

我々自身の先行研究では、接触型相互作用を行う純粋な1次元ボース気体では、最初に生成した熱的に非平衡な運動量分布は極めて長時間にわたり変化することなく維持されており、系は熱平衡状態には至ることはないという結果が得られていた。これはこの系が可積分系とみなしてよいことを示している。そこで系がもつ可積分性を崩す非可積分項として、1次元チューブ間にトンネリングを誘起させ、その後のダイナミクスを観測した。実験では、まず2次元光格子の節に相当する軸状のチューブ内に BEC を誘導し1次元系を生成した。次に、チューブ軸に沿って別の光格子ビームを2回、短時間のパルスを適当な時間間隔をあけて照射し、原子集団を2度回折させて、 $\pm 2\hbar k$  ( $k$  は定在波の波数)の運動量をもつ熱平衡から極めて遠く離れた非平衡状態を生成した。その後、各原子は軸に沿った弱い閉じ込めポテンシャルの中で周期運動を行いながら、他原子との衝突(区別は出来ないが反射と透過を含む)を繰り返す。この周期運動の際、チューブ間にトンネリングが起こりうるようチューブ内への閉じ込めを弱め、1周期平均した運動量分布が時間の経過とともにどのように変化していくかを調べた結果が図1の(b)～(d)である。トンネリングが無視で

きる純粋な1次元系の場合(図1 a))には、 $15\tau$ 後の運動量分布から粒子のロスなどを考慮し $40\tau$ 後の分布を計算すると、実測した分布と極めてよく一致し熱平衡化は起こらないと判断できる。一方、トンネリングが起こる場合は、各原子が周期運動を重ねるにつれて、運動量分布が熱平衡時に得られる幅の狭いガウス関数形に近づき、明らかに緩和していることがわかる。

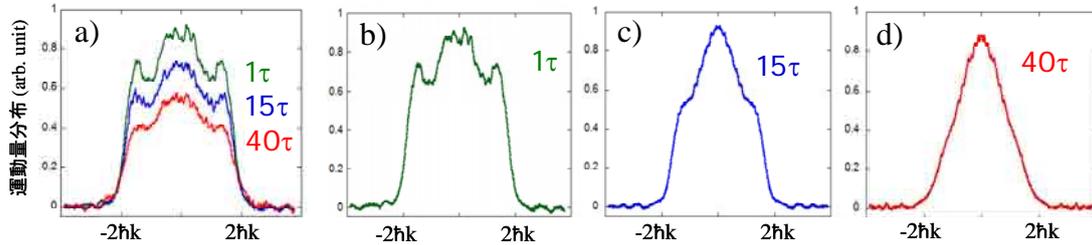


図1 非平衡な運動量分布を与えた後の運動量分布の時間経過。 $\tau$ は1次元の軸方向の運動の周期を表す。a) トンネリングが無視できる純粋な1次元系。閉じ込めの深さ $11\mu\text{K}$ 、b)-d) 閉じ込めが弱く( $3.8\mu\text{K}$ )、1次元チューブ間にトンネリングが起こる場合。

熱平衡状態へのレートは、1次元への閉じ込めを弱くしトンネリングを起こしやすくするほど大きくなり(図2)、閉じ込めを弱くした極限では、最初1次元方向にのみ保持していたエネルギーは、3次元方向に均等に分配されている。

トンネリングにより平衡状態への緩和が誘発されることが明白になったが、その緩和機構そのものは完全には解明されていない。我々の実験条件下では、2体の原子の衝突のみでは、チューブ間のトンネリングレートを増大させるほど十分なエネルギーは解放されず、従って、現時点では、2体の衝突ではなく3体の衝突とトンネリングが関与している、という結論に達した。このシナリオを確かめるには、より複雑な理論計算が必要であり、現在もなお理論グループとの共同研究が続いている。また、実際の実験では閉じ込めの深さがおよそ $8\mu\text{K}$ (トンネリングエネルギー  $< \sim 10\mu\text{K}$ )より大きくなると、運動量分布の変化は非常に小さく、装置系の分解能と同じレベルになるため、本当に熱平衡状態に向かっているのかどうかの判定が難しくなる。そのため、現時点では $8\mu\text{K}$ という値を閾値とみなせるかどうかは結論が下せていない。閾値の有無は、古典論でのKAM理論の重要な帰結が、実際の量子多体系にも適用できるかを定める重要な問題であり、この問題も引き続き検討中である。

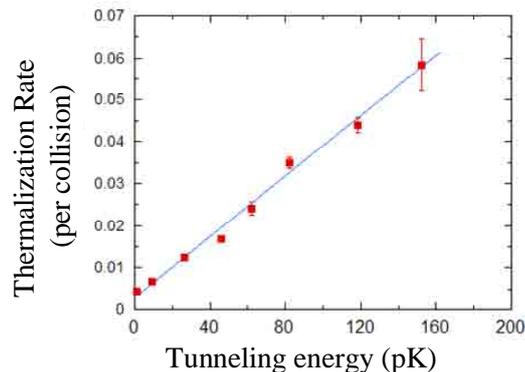


図2 熱平衡状態への緩和レート/衝突とトンネリングエネルギー $J$ の関係。 $J$ と閉じ込めの深さ $U$ とは、 $J \propto e^{-U}$ の関係がある。

## (2) 純光学的ボース=アインシュタイン凝縮(BEC)の生成への準備

米国より帰国後、光格子中の冷却原子気体を中心テーマとした自らの実験グループを立ち上げ、必要な装置系の再構築を行っている。BECの高速生成による測定の高効率化とスピノールBECへの展開、さらに高分解能のイメージングを可能にするために、光学ガラスセル中での純光学的手法によるBECの生成をまず目指した。ガラス製キャピラリープレートによりコロレートされたRb原子ビームを生成、これを周波数チャープによりドップラー冷却して光学セルに誘導し、磁気光学トラップ(MOT)内に捕獲した(図3)。MOT内へは $10^8$ 個/sのレートで、およそ $80\mu\text{K}$ に冷却された原子集団が捕獲できた。さらに、MOTを圧縮した後、3次元の光格子内へと送り込み、そこで偏光勾配冷却を行うことを予定している。必要な高出力光源の製作と光双極子トラップへの準備も終えており、現在、実験を進行中である。

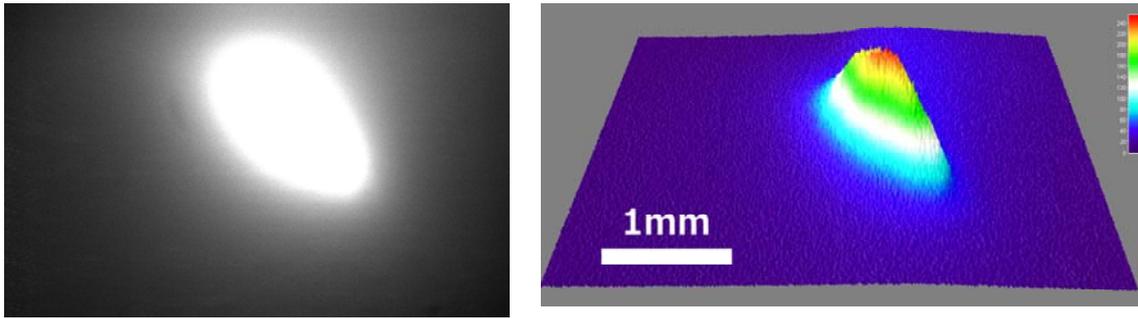


図3 強光度蛍光イメージングによるMOTの観測

## 5. 自己評価

本研究課題は BEC 後に原子集団を光格子中に誘導し、そこで発現する物性現象を研究するもので、当然 BEC の生成が前提となっている。米国から帰国後、実験を一から再び立ち上げる必要があったため、当初予定していた研究課題を軌道修正してもさきがけ期間内に遂行するには、困難になってしまった。立ち上げを行いながら、米国でやり残した仕事を完成させたかったが、解析は複雑かつ難しく、学会や会議などで発表は行っているが、論文としてまとめ上げるまでには現時点でも至っていない。ただ、光格子に関する研究は多くの可能性をもっているが、本研究のように系の可積分性に着目し、非可積分項の印加と操作によって非平衡過程の解明を目指した研究例はなく、熱平衡から遠く離れた状態という物理の未開拓分野に、新たな実験的アプローチがあることを示せたのではないかと考えている。

## 6. 研究総括の見解

情報の媒体として冷却原子を利用する新技術の開発が期待され、本研究では光格子中の冷却原子の流れや輸送に関する物理を探求することに取り組んだ。具体的には、欠陥などを含まない極めてクリーンな物質波の導波路としての1次元ボース気体の、非平衡ダイナミクスの物性現象観測を目標に研究を行った。

接触型相互作用を行う純粋な1次元ボース気体において、最初に生成した熱的に非平衡な運動量分布は極めて長時間にわたり変化することなく維持されこの系が可積分系とみなしてよいことを見出し、一方、トンネリングが起こる場合は、各原子が周期運動を重ねるにつれて、運動量分布が熱平衡時に得られる幅の狭いガウス関数形に近づき、トンネリングにより平衡状態への緩和が誘発されることを見出した。今後、この緩和機構の解明、閉じ込め深さの閾値検討などが必要であるが、解析は複雑かつ難しく、学会や会議などで発表は行っているが、論文としてまとめ上げるまでには至っていない。ただ、光格子に関する研究は多くの可能性をもっているが、本研究のように系の可積分性に着目し、非可積分項の印加と操作によって非平衡過程の解明を目指した研究例はなく、熱平衡から遠く離れた状態という物理の未開拓分野に、新たな実験的アプローチがあることを示せたのは意義あることである。

現在立ち上げている実験系にて、BEC 後に原子集団を光格子中に誘導し、そこで発現する物性現象の研究成果に期待する。

## 7. 主な論文等

(A) さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

(1) 論文(原著論文)発表

- ・木下俊哉、“光格子を利用したアトムロニクスのためのデバイス開発”  
レーザー学会誌 レーザー研究、2009年1月号

(2) 学会発表

- ・木下俊哉, Trevor Wenger, Jean-Felix Riou, Zhongyao Sun, David S. Weiss、 “可積分性が破られた1次元ボーズ気体の振る舞い”、日本物理学会 第62回年次大会 2007年 9/21 - 24 北海道大学

(3) 招待講演

- ・Toshiya Kinoshita、 “Experiment with One Dimensional Bose Gases” (Invited Talk)  
Nagoya Workshop on “Superfluidity and microscopic properties on quantum atomic assembly”  
October 10, 2008 at Nagoya University, Nagoya
- ・木下俊哉、“Experimental Studies of One Dimensional Bose Gases” (Invited Talk)、特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」、平成20年度研究成果報告会、December 19 - 21, 2008 奈良県新公会堂(奈良市)
- ・木下俊哉、“Non-Equilibrium 1D Bose Gases” (レビュー招待講演)、基礎物理学研究所研究会「熱場の量子論とその応用」、2009年9月3 - 5日 京都大学 基礎物理学研究所
- ・木下俊哉、“Non-Equilibrium 1D Bose Gases” (招待講演)、第2回『アインシュタインの物理』でリンクする研究・教育拠点研究会、2009年 10月23 - 24日 大阪市立大学 学術情報センター