

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400416

研究課題名(和文)光格子時間変調による極低温原子波束の動的制御と精密計測

研究課題名(英文)Control of dynamics and high precision measurement of ultracold atomic wave packet by temporally modulated optical lattice

研究代表者

渡辺 信一(Watanabe, Shinichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：60210902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：理論研究では、放物型トラップ中のポテンシャル最小値近傍に捕獲された冷却原子が、光格子の振幅変調の影響下で如何に振る舞うかを調べた。ハンブルグ大学で実施された実験との詳しい比較をして、実験におけるホール状態の減衰は、数値計算よりも急速に起こることが分かった。完全に孤立した格子システムでは、ホールダイナミクスが、非常に長いコヒーレンス時間を有することを見出した。

実験研究では、マイクロ光トラップアレー中のレーザー冷却Rb原子を用いて量子多体系の量子シミュレーションを実現することを目指した。最大4個の原子間で量子もつれ状態を作る事ができ、量子スピン系のシミュレーションを実現する見通しが立った。

研究成果の概要(英文)：In the theoretical study, we examined how ultracold atoms captured near the potential minimum in a parabolic trap would behave under the influence of amplitude modulation of the optical lattice. A detailed comparison with the experiments carried out at University of Hamburg showed that attenuation of the hole state in the experiment occurs more rapidly than in the numerical calculation. We found that in a completely isolated lattice system, the hole dynamics has a very long coherence time.

On the experimental side, we aimed to realize the quantum simulation of quantum many-body system using laser-cooled Rb atoms in a micro-light-trap array. We can create a quantum entanglement state involving at most 4 atoms, and we are close to realizing quantum simulation of a quantum-spin system.

研究分野：原子・分子・光物理学

キーワード：極低温原子波束 photoconductivity ホールダイナミクス フェルミ原子系 リドベルグ原子 量子シミュレーション 量子多体系 量子もつれ

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却による極低温原子生成の実現に端を発して、量子凝縮体（ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ凝縮）の物理学へと続く一連の輝かしい研究が行われた。また量子情報理論に基づく新しい情報通信技術の開発も試みられてきた。最近ではさらに極低温原子を用いて量子現象のシミュレーションを行おうとする量子シミュレーターの理論的および実験的研究も多数実施されている。いずれの技術も極低温原子の重心運動あるいは内部自由度の量子状態を自由に制御することを眼目としている。そのための様々な取り組みが国内外で精力的に推進されている。

当該研究では磁気トラップと光格子の影響を同時に受けた極低温原子（凝縮体）のダイナミクスを理論的に研究することを目指した。磁気トラップに捕獲された極低温原子に光格子を作用させると重心運動の固有エネルギーにバンド構造が現れる。近年の研究では光格子の強度変調で、バンド間あるいはバンド内の遷移を制御して原子の空間配置を操ることが可能になってきている。

文献[1]に例示されているシステムは、基礎研究と応用研究の両面において特筆すべき点が多い。例えば、特定のエネルギーにおいて、空間配置が極めて狭いものを利用することで波束を局在化できる。さらに、励起状態の占有領域は100マイクロメートルとかなり大きく取れるし、バンド境界でのブラッグ反射で、凝縮体を複数個に分割してコピーを作ることでもできるなど、干渉計をデザインする上で極めて興味深い特徴がある。例えば、局在波束対に位相差が生じる外場が作用するならば、局在時間と同じだけ長い相互作用時間（interrogation time）が得られる。

我々はこれまで様々な量子系について実験や厳密な量子計算を実施してきた。例えば、中川はトラップ中に BEC を生成し、誘導ラマン散乱を用いて重心運動を制御する実験を行い、高コントラストの量子干渉を観測している。渡辺はそれに触発されて Time-Dependent Schrödinger Equation 法を用いて、BEC 原子干渉計のシミュレーションを行ってきた。また、極低温原子の Fano-Feshbach 共鳴分子生成率についてボゾン系とフェルミオン系の差異を統計的手法で研究してきた。我々がこれまで研究してきた原子干渉計や凝縮体の動力学という視点から、磁気トラップ+光格子の中での極低温原子（凝縮体）のダイナミクスを考察することによって、バンド構造に依拠する局在波束を利用した精密計測という着想に至った。

<参考文献>

[1] “Production and manipulation of wave packets from ultracold atoms in an optical lattice”, P. L. Pedersen et al, *Phys. Rev. A* 88, 023620 (2013); “Dynamical control of matter-wave splitting using

time-dependent optical lattices”, S. J. Park et al, *Phys. Rev. A* 85, 033626 (2012)

## 2. 研究の目的

前述および関連の実験では、磁気トラップ+光格子の中のボゾン系とフェルミオン系の差異も観測されていることから、両者の干渉計としての寿命の違いなどを理論的に吟味する。このように、基礎的観点から光格子の動的強度変調による精密計測を目指した研究は、先端技術の発展と応用への寄与という観点から意義深い。本研究において、渡辺は磁気トラップ+光格子中での凝縮系のダイナミクスを理論的に研究する。原子集団を記述する波束の初期値問題を数値的に解く。先行実験がシガー型の磁気トラップを用いていることから、まず1次元系として扱い、励起および脱励起のメカニズムの詳細を理解することが一つの目的である。そのために量子状態を記述するパラメーターの値を様々に変えながら、データを集積する。トラップポテンシャルが完全に放物面となっている場合、等時性により波束はその形状を保ち続ける。しかし、実際には不完全な放物面である上、光格子が放物面の持つ対称性を壊すことから、波束は有限の寿命で拡散して行く。ハンブルグ大学の Itin 博士との共同研究を通じて、この拡散時間の数理解析理論を展開する。また、凝縮体は原子間相互作用の影響を強く受けることを考慮してパルスの周期および形状の変化を研究する必要がある。このように波束のダイナミクスから、原子集団の振る舞いについての知見を得て、サイトへのアクセスと局在化を利用した新型原子干渉計を考え、実験のためコヒーレンスの評価を行うことも目標である。

一方、中川は極低温原子を用いた原子干渉計および量子シミュレーションの実験研究を進めている。この原子干渉計において検出感度を向上するため、磁場または光トラップ中の原子を用いて長い相互作用時間を得る方法、また光格子ポテンシャルを用いて数10以上の高次の反跳を与える方法が検討されている。そこで本研究においては、渡辺の研究と連動して光格子ポテンシャル中で高次の反跳を用いた原子干渉計実験の吟味を行い、実験に必要なパラメーターについて考察することも目的である。

本研究で扱う系の持つ高いサイト・アクセシビリティを量子情報用メモリーへ応用することや数値解析によって超精密計測へ応用する指針を与えることは極めて重要である。その理由の一つは、光格子の強度変調による励起および脱励起の選択則は光の双極子遷移の場合とは異なっているため、光と原子の相互作用の理解を通じて培われた常識はそのままでは通用しない。従って、数値計算に基づいた理論計算を行うことで、効率よい励起・脱励起の径路を見出すことは、試行錯誤的な実験に比べて探索の時間を大いに

短縮することになる。また、量子凝縮体を用いた精密計測は現実的な応用の段階にきており、この時期に様々な提案を行うことは本分野のみならず応用の対象となる諸分野で発展する可能性が高い。従って、これに関わるコヒーレンスの探求は本研究の主な目標である。

### 3. 研究の方法

基本的な計算コードはこれまでの理論研究で開発されてきた。今回対象とする系の物理的なサイズが大きいことから、渡辺は大学院生と協力して、初年度に現在までの実験結果を数値シミュレーションによって再現するための計算コードを整備・開発した。時間に依存するシュレーディンガー方程式を空間 DVR 法とルンゲクッタ時間伝播法を組み合わせることで直接数値的に解く Time-Dependent Schrödinger Equation 法を適用した。ハンブルグ大学の Itin 博士の協力の下に、2年目には計算データをもとに実験の再現と解釈を実施した。数値結果の物理的解釈のために半古典的なモデルを構築して、(準)解析解を求め、数値シミュレーションの結果と比較した。3年目には中盤までの成果をまとめるに至った。

また、バンド間遷移に強く関与すると見られる原子間相互作用を平均場近似レベルで取り込む計算は準備段階のままとなった。そのため、今後は計算手法の安定性の再検討をまず行い、計算手法の開発を発展的に継続していく。

実験においてはマイクロ光トラップアレーが光格子同様の操作性を持つうえ、任意の結晶構造を容易に実現できるメリットがあることから、中川が中心となって、レーザー冷却した Rb 原子を用いて、量子スピン系のシミュレーションを目指した。手法はリドベリー原子の持つ大きな双極子を利用して、近傍の原子に van der Waals 力による大きな離長を与えるリドベルグ・ブロッキングである。一つの原子が励起されると近接されるサイトの原子は励起されなくなる。このようにして強反磁性の性質をシミュレートする。

### 4. 研究成果

(1) 数値計算と準古典的理論計算を用いて、放物型トラップ中の光格子の振幅変調によるフェルミ系のホール動力学を再検討した。量子計算による基底状態から Wigner 分布のような半古典的な分布関数を準備して、古典力学の計算を実施した。長い時間スケールで正確な量子動力学をかなりよく再現されることが分かった。ホール状態の時間依存性を調べた。実験におけるホール状態の減衰は、数値計算の場合よりも急速に起こる。ホール状態の減衰に何が影響するかを明らかにするために、実験の系の初期温度が有限であること、実験が 3次元であること、放物型トラ

ップに非調和歪みがあることの3つの可能性を検討した。いずれも理論と実験の不一致を説明するには不十分であることが分かった。また、振幅変調の不完全性、すなわち励起周波数に第2高調波や白色雑音が混入している可能性を調べた。しかし、それらはホールのダイナミクスを実質的に変化させないことを見出した。実験との相違は、パルス後の時間発展中に原子の喪失や、環境による加熱によって引き起こされる可能性もある。より詳細な実験的検討が有用であるかもしれない。数値結果は、完全に孤立した格子システムならば、ホールは本質的に長いコヒーレンス時間を有することを示す。これは、ボーズ・アインシュタイン凝縮体で形成されたボソニック・ウェーブ・パケットに対応するものとして、ホール状態が干渉計の量子素子として使用できることを示唆しており、今後の実験に有用な情報を提供するものと考えられる。

(2) 高密度でかつ消滅しにくい波束の生成を主な目的として、放物形光格子系における超低温ボゾン原子のダイナミクスを調べた。この目的のために、数値シミュレーションおよび半古典的近似を用いて、励起された波束の励起プロセスとその後のダイナミクスを研究した。

(2)-a 波束の生成中にエネルギーバンドがどのように占有されるのか分析した。現在の実験振幅変調の強度は非常に高く、原子に作用するレーザー光に匹敵する。従って、多光子励起のような現象が、物質・光相互作用のいわゆる強結合領域のように起こりうる。このように、量子光学の言語を用いて、ブロッホバンド集団の時間依存性を単一の擬運動量に基づくラビモデルによって説明した。

単純ながら、提案のモデルは確かに厳密な数値計算と良好な一致を示した。また、さらに単純に波束生成を高める方法として、2周波数励起プロセスを検討した。すなわち、光格子振幅変調の  $\pi$  パルスを2回に分けて印加する。まず、第1パルスによって励起し、励起状態の占有率が最大に達した瞬間に第2パルスを印加する。実施した計算例で約3倍の生成率を確認した。非常に有望な結果である。

(2)-b その後のダイナミクスとエネルギーバンドギャップが波束にどのように影響するかを調べた。我々が観察した1つの特徴は、比較的小さいギャップが不完全なトランスミッタとして振る舞い、波束の崩壊を引き起こすことである。バンドギャップ間の LZ 遷移率のよく知られている半古典的が、合理的な見積もりをもたらすことが検証される。興味深い特徴は、放物線ポテンシャルの LZ 遷移率が位置と擬運動量の両方に依存することである。すなわち励起パラメータの具

体的な値が LZ 遷移の影響を受けることである。逆説的に言えば、このようなバンドギャップに起因する効果の発現は、光格子パラメーターの適切な制御で、物質波を自由に操作できる可能性を意味している。

(3) 本分析は、擬一次元システム、すなわち、光格子方向に垂直な成分がきつく閉じ込められている系にはよくあてはまる。今後、より詳細に検討されるべき点について述べる。現在の取り扱い、現実的な三次元系に拡張されるべきである。さらに、実際の実験を分析するためには、実験初期条件を再作成する必要がある。そのような実験的知識は現在、不完全にしか利用できない。この研究では、初期状態を絶対零度の基底状態と推定した。その代わりに、実験的初期条件を推論するために様々な初期状態を理論的にシミュレートすることができる。次元に加えて、非線形性も興味深い問題である。我々は以前に報告されたシステムの構成を調べ、平均場近似の弱い非線形性が古典的分離行列の変形を介して波束を安定化させることを検証した。非線形性が増加すると、波束は急に不安定になることを見出した。

放物型光格子系は、量子情報のメモリーレジストリーだけでなく、多種多様な応用があるとされている。フェルミオン原子の場合、振幅変調は、光伝導と同様に粒子・正孔対を生成することができる。現在の線形システムから得られた洞察に基づいて探求すべきことが、まだ多く残されている。

(4) 実験では、マイクロ光トラップアレー中のレーザー冷却 Rb 原子を用いて量子多体系の量子シミュレーションを実現することを目指した。最大 4 個の原子間で量子もつれ状態を作る事ができ、量子スピン系のシミュレーションを実現する見通しが立った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. “Dynamics of fermions in an amplitude-modulated lattice”  
Tomotake Yamakoshi, Shinichi Watanabe, Shun Ohgoda, and Alexander P. Itin  
Phys. Rev. A **93**, 063637 (2016) - Published 30 June 2016 (査読あり)
2. “Highly uniform holographic microtrap arrays for single atom trapping using a feedback optimization of in-trap fluorescence measurements”  
Hikaru Tamura, Tomoyuki Unakami, Jun He, Yoko Miyamoto, and Ken'ichi Nakagawa  
Optics Express **24**, 8132-8141 (2016)  
(査読あり)

3. “Wave-packet dynamics of noninteracting ultracold bosons in an amplitude-modulated parabolic optical lattice”  
Tomotake Yamakoshi and Shinichi Watanabe  
Phys. Rev. A **91**, 063614 (2015) - Published 12 June 2015 (査読あり)

[学会発表] (計 19 件)

1. “光誘起衝突を用いた光マイクロトラップ中の単一原子ローディングの高効率化”  
山口祐介、田村光、中川賢一  
日本物理学会 2016 年秋季大会  
2016/09/15 金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市)
2. “単一原子アレー中のリドベルグブロッケード観測 II”  
田村光、山口祐介、海上智行、竹村直貴、中川賢一  
日本物理学会 2016 年秋季大会  
2016/09/15 (金沢大学角間キャンパス (石川県金沢市))
3. “Exact and semiclassical fermion dynamics in amplitude modulated lattices”  
Tomotake Yamakoshi, Shinichi Watanabe, Shun Ogoda, and Alexander P. Itin  
The 25<sup>th</sup> International Conference on Atomic Physics (ICAP2016) 2016/07/24-29 Seoul (Korea)
4. “2 色光格子によるスピン偏極フェルミ原子の操作”  
高山雄基、山越智健、大胡田駿、渡辺信一  
第 13 回 AMO 討論会  
2016/06/3-4 理化学研究所 (埼玉県和光市)
5. “単一原子アレー中のリドベルグブロッケード観測”  
田村光、海上智行、竹村直貴、中川賢一  
日本物理学 第 71 回会年次大会  
2016/03/22 東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
6. “トランスファー共振器を用いたリドベルグ励起光源の周波数安定化”  
田村光、海上智行、竹村直貴、中川賢一  
日本物理学 第 71 回会年次大会  
2016/03/22 東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
7. “光格子および調和トラップ中での偏極フェルミ原子気体におけるホールダイナミクス”  
山越智健、大胡田駿、Alexander Itin、渡辺信一  
日本物理学会 第 71 回年次大会  
2016/03/20, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
8. “光マイクロトラップアレーの単一原子ローディング”  
田村光、海上智行、竹村直貴、中川賢一  
日本物理学 第 71 回会年次大会

- 2016/03/18 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
9. “冷却リドベルグ  $^{87}\text{Rb}$  原子集団を用いた非線形量子工学効果”  
田村光、海上智行、竹村直貴、中川賢一  
日本物理学 第71回会年次大会  
2016/03/18 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
10. “ $^{87}\text{Rb}$  原子のリドベルグ状態励起用480nm高出力周波数安定化レーザーの開発”  
竹村直貴、田村光、金井大輔、中川賢一  
日本物理学 第71回会年次大会  
2016/03/18 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
11. “空間光位相変調器を用いた光マイクロトラップアレーの実現”  
海上智行、田村光、宮本洋子、中川賢一  
日本物理学 第70回会年次大会  
2015/03/23 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
12. “光誘起衝突を用いた光マイクロトラップ中の原子制御”  
海上智行、田村光、中川賢一  
日本物理学 第70回会年次大会  
2015/03/23 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
13. “光格子の振幅変調による極低温フェルミ原子ガスにおけるホールダイナミクス”  
大古田駿、山越智健、渡辺信一  
日本物理学会 第70回年次大会  
2015/03/21 早稲田大学(東京都新宿区)
14. “光格子および調和トラップ中での冷却ボーズ原子励起波束の生成と安定性”  
山越智健、渡辺信一  
日本物理学 第70回会年次大会  
2015/03/21 東北学院大学泉キャンパス  
(宮城県仙台市)
15. “Non-interacting ultracold atoms in amplitude modulated parabolic optical lattices”  
Shinichi Watanabe  
International Scientific Spring 2015 (invited)  
2015/03/16-20  
Islamabad (Pakistan)
16. “Interference substructure in photoelectron spectrum of one-electron negative ion in the stabilization regime”  
Shinichi Watanabe  
International Scientific Spring 2015 (invited)  
2015/03/16-20  
Islamabad (Pakistan)
17. “Manipulating ultracold atoms towards the development of quantum technologies”  
Ken'ichi Nakagawa  
The 8<sup>th</sup> International Conference on Photonics and Applications (invited)  
2014/08/12-16 Da Nang city (Vietnam)
18. “Dynamics of ultracold atoms in

- amplitude-modulated parabolic lattices”  
Tomotake Yamakoshi, Shun Ohgoda,  
Shinichi Watanabe, Alexander Itin  
The 24th International Conference on Atomic Physics  
2014/08/03 Washington, D.C. (USA)
19. “光格子および調和トラップ中の冷却原子気体のダイナミクス”  
山越智健, Alexander Itin, 渡辺信一  
第11回AMO討論会  
2014/06/07 大阪大学豊中キャンパス(大阪府吹田市)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
渡辺 信一 (WATANABE, Shinichi)  
電気通信大学・情報理工学研究科・教授  
研究者番号: 60210902
- (2) 研究分担者  
中川 賢一 (NAKAGAWA, Ken'ichi)  
研究者番号: 90217670  
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・教授