

# 研究終了報告書

## 「光共振器増幅された光格子中での冷却分子の精密分光」

研究期間：2017年11月～2021年3月

研究者：小林 淳

### 1. 研究のねらい

近年のレーザー冷却技術の発展により、極低温原子のみならず極低温分子を使った研究が幅広く進められており、基礎物理学実験、量子計算・量子シミュレーション、極低温の化学反応などが行われている。私の研究では、特に極低温分子の精密分光による基礎物理定数の恒常性検証実験や、極低温の化学反応および光化学反応の研究を目標としている。

#### <電子・陽子質量比の恒常性検証実験>

原子および分子のエネルギー構造は、電磁気力の強さを表す微細構造定数  $\alpha \sim 1/137$  や、電子・陽子質量比  $\mu \sim 1/1836$  といった無次元の物理量によって決定されている。そこで原子や分子エネルギーを高精度に測定することによって、これらの無次元物理量が本当に不変な定数であるかを検証することが可能である。特に、分子は  $\mu$  の変化に敏感である。

私のこれまでの研究で、分子を用いた実験として最も高精度な恒常性検証実験を実現している。ところがこの実験は、トラップされていない分子を使った測定であるために、分子の拡散によって測定精度が制限されていた。また実際に測定に使われている分子数は非常に少なかった。そこでさきがけ研究では、高速かつ高効率に光格子中に分子を生成する新しい分子生成法の開発を行った。

#### <高速・高効率な極低温分子生成法開発>

従来、原子を量子縮退温度まで冷却するためには、蒸発冷却と呼ばれる手法がとられてきた。この手法は幅広く用いられている手法であるが、①原子数ロスが大きい、②冷却が遅いという2つの欠点があった。これらの欠点を克服した手法として、光格子中でのレーザー冷却と圧縮を行う手法が開発され注目を集めている。私のさきがけ研究でもこの手法を取り入れた分子生成法を開発した。

#### <極低温分子の化学反応>

常温の分子は系の温度に従って、内部自由度および外部自由度が共に熱的に分布している。他方で極低温の分子は単一の振動・回転準位に存在しており、重心運動としても極低温にまで冷却されている。このような状況では量子的な効果が強く現れ、化学反応の状況は大きく異なる。特に、単一の量子状態にある分子が反応後にどの量子状態へと分布していくかを1量子状態レベルで詳細に調べることにより、極めて詳細な化学反応研究が可能となる。このような原子核の入れ替えを伴う化学反応の量子力学的な計算は非常に複雑であり、実験的な研究が不可欠である。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、研究テーマ C「電子・陽子質量比の恒常性検証実験」および研究テーマ D「極低温分子の化学反応研究」を進めることが狙いである。そのために、初めに研究テーマ A「光

共振器増幅された光格子トラップの評価を進め、その後研究テーマ B「光共振器増幅された光格子トラップによる原子の冷却と分子生成」を進めるという順番で研究を進めてきた。

研究テーマ A では、研究開始当初の計画よりも高性能な光共振器の作成に成功し、さらにその共振器により増幅された光格子を用いて  $3 \times 10^7$  個という大きな原子数をトラップすることに成功した。

この成功を受けて研究テーマ B では研究の軌道修正を行い、原子を BEC 温度まで冷却してから、高効率に分子を生成することにした。光格子中でのラマンサイドバンド冷却や光格子の操作による圧縮を行い、本研究で開発してきた、高速・高効率な冷却法が非常に有効であることを実験的に示すことに成功した。到達温度は今のところ 550nK で BEC 転移温度付近まで冷却できている。冷却限界を決めている要因は、圧縮時のわずかに残っている光格子と考えられ、これは技術的に除去可能であり、この手法で BEC 転移温度まで冷却可能と考えられる。今後は光格子中に分子を生成し、研究テーマ C と D を進めていく予定である。

ただし、上記の軌道修正に加え、新型コロナウイルスの影響や私の異動による実験装置の移設などの影響によって、研究テーマ C と D の実験の開始が遅れてしまった。

研究テーマ C については、自由空間中に生成した極低温分子の精密分光による電子・陽子質量比の恒常性検証実験について論文をまとめた。Nature Communications に掲載され、プレスリリースも行った。この研究では、分子を用いた実験の中では最も高精度な恒常性検証実験を実現した。

研究テーマ D については、反応熱の小さい極低温化学反応の例として、Efimov 状態の緩和現象に注目して、理論的考察を進めた。Efimov 状態は原子核物理学における中性子過剰核の議論で重要な役割を果たしているが、冷却原子系でも実験可能である。Efimov 状態は特殊な 3 原子束縛状態であるが、一定の寿命の後で 2 原子分子と原子に解離する。この時に放出されるエネルギーはわずか 10mK ほどと非常に小さいため、解離後の分子状態を 1 量子状態レベルで検出可能であり、詳細な研究が可能となる。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A「光共振器増幅された光格子トラップの評価」

電子・陽子質量比の恒常性検証実験の高精度化や極低温分子の化学反応研究を行うため、さきがけ研究では、高速・高効率に光格子中に分子を生成する手法の開発を目指して研究を進めた。従来、ほとんどすべての実験で、原子を量子縮退温度まで冷却するために、蒸発冷却と呼ばれる手法が使われてきた。ところがこの手法は、①原子数ロスが大きい、②冷却が遅いという 2 つの欠点があった。これらの欠点を克服した手法として、光格子中でのレーザー冷却と圧縮を行う手法が開発され注目を集めている。私のさきがけ研究でもこの手法を取り入れた新しい分子生成法を開発した。

まず、磁気光学トラップによるレーザー冷却によって原子を 100uK 程度まで冷却し、その原子を光格子でトラップする。その後その中で Raman サイドバンド冷却によるレーザー冷却と光格子の操作による圧縮を行うことで、原子を BEC 相転移温度まで冷却する。さらにそこから分子を生成するという手順になる。ここで重要なのが、大きくて深い光格子を作成することによって、たくさんの原子をトラップすることであるが、そのための手法として、光共振器による光増

幅機構を利用して、大きくて深い光格子を実現した。

具体的には、真空チャンバー内に高反射率でロスのない小さいミラーを配置し、フィネスが 7 万ほどの高フィネス光共振器を構築した。この共振器により光増幅率は 2 万倍が得られる。そのため、わずか 10mW の入射光は 200W に増幅され、直径 1 mm、深さ 300uK の光格子が形成される。さらにこの共振器を 3 軸方向に配置することで、3 次元光格子中を構築した。この光格子に対して、磁気光学トラップで冷却された原子をロードし、 $3 \times 10^7$  個の原子をトラップすることに成功した(図 1)。この原子数は先行研究で得られた原子数( $10^3$  程度)に比べて、1 万倍も大きな原子数となっている。

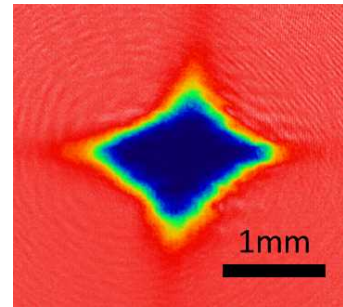


図 1: 3 次元光格子中の原子

### 研究テーマ B「光共振器増幅された光格子トラップによる原子の冷却と分子生成」

3 次元光格子中にトラップされた原子に対して、ラマンサイドバンド冷却による冷却と光格子の操作による圧縮を行う。ラマンサイドバンド冷却では、振動準位を 1 つ下げる誘導ラマン遷移と内部状態を元に戻すリポンプ遷移を繰り返すことで、原子の振動準位を 1 つずつ下げていき、原子を振動基底状態まで冷却することができる。さらに、その状態である軸の光格子を切ると、原子は他の軸の光格子で形成されているポテンシャルによって中心に集まる。そこで再度光格子を立ち上げると、空間的には原子は圧縮され、その反作用として光格子のサイト内でのエネルギーは上がっている。このラマンサイドバンド冷却と光格子操作による原子の圧縮を繰り返すことによって、原子は圧縮・冷却されていく。また、この操作は高速に行うことが可能で、例えば 5 回の冷却・圧縮を行う実験はわずか 300ms で行われる。

実験結果は図 2 のようになり、圧縮回数が増えるごとに原子が圧縮・冷却されていることが分かる。この結果から、この手法によって、高速・高効率に原子を冷却できることを実験的に実証できた。温度としては 550nK まで到達しており、BEC 相転移温度である 200-300nK に近いところまで冷却が出来ている。この到達温度を制限する要因として、圧縮時に光格子がわずかに残ることが原因と考えており、その対策として光格子レーザーにサイドバンドを立て、光格子をキャンセルする手法を準備中である。

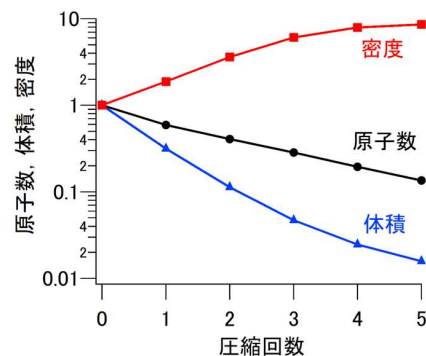


図 2: 3 次元光格子中の冷却と圧縮 3

今後はさらに冷却を進めて BEC を生成し、光格子の断熱的操作による超流動—MOTT 絶縁体転移を利用して、1 サイトに 2 個の原子が導入されるサイト数を可能な限り増大させる。その中で 2 つの原子を分子へと会合させて多数の分子を生成させ、極低温分子を使った実験へとつなげていく。

### 研究テーマ C「電子・陽子質量比の恒常性検証実験」

さきがけ期間中に、自由空間中に生成した極低温分子の精密分光による、電子・陽子質量

比の恒常性検証実験についての論文を執筆・投稿し、Nature Communications[1]に掲載され、プレスリリースも行った。この研究では、極低温の分子を使うことによって、電子・陽子質量比に対する感度を、約 1.5 万倍と非常に大きく増幅して検証する測定を実現した。その結果、従来の常温の分子を用いた検証実験の精度を 5 倍以上更新することに成功し、分子を用いた検証実験としては最も高精度な検証実験を実現した。

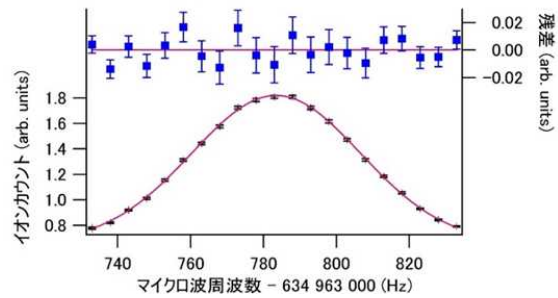


図 3: 極低温分子の精密分光による電子・陽子質量比恒常性検証実験

### 研究テーマ D「極低温分子の化学反応研究」

通常、化学反応で発生する反応熱は、冷却原子系で扱うエネルギースケール( $\sim \mu\text{K}$ )に比べ 6 桁以上も大きいので、反応生成物を検出することが困難である。そのため、私の研究では高感度なイオン化検出法によって生成物を検出することを計画していた。その中で、さきがけ期間中に別の研究グループが、生成物をイオン化検出によって検出することに成功したと報告した。この研究でイオン化検出法が適した手法であることは実証されたが、彼らは発熱の大きい( $\sim 10\text{K}$ )化学反応を使っていたため、生成物の量子状態まで特定することは困難に思えた。

そこでさきがけ研究では、反応熱を減らす手法について考察し、2 つの手法が有効と考えられた。1 つは反応熱が非常に小さい化学反応の研究である。その候補として Efimov 状態の緩和現象に着目している。Efimov 状態は原子核物理学における中性子過剰核の議論で重要な役割を果たしているが、冷却原子系では実験パラメータを詳細に制御できることで注目を集めている。Efimov 状態は特殊な 3 原子束縛状態であるが、一定の寿命の後で 2 原子分子と原子に解離する。この時に放出されるエネルギーはわずか  $10\text{mK}$  ほどと非常に小さくなると予想された。解離後の分子状態を 1 量子状態レベルで検出することで、Efimov 状態の緩和現象の詳細な研究が可能となる。

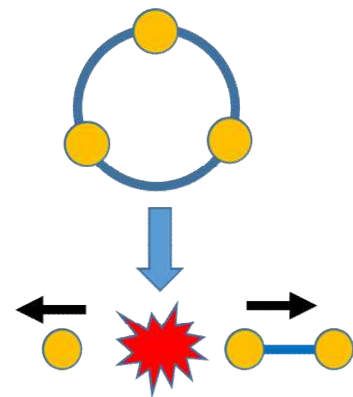


図 4: Efimov 状態の緩和現象

もう一つは、極低温分子間の光会合である。光会合による加熱は光子の反跳によるものであり、 $1\mu\text{K}$  以下の加熱しか起こらない。このような小さな反応熱であれば生成物のトラップが十分に可能であり、より多原子な極低温分子生成へとつながる研究となる。

### その他

京都大学量子光学研究室での研究に参加し、光格子中の Yb 原子を使った量子シミュレーションに関する研究を行った。[2,3,4]

### 3. 今後の展開

上記の研究成果に示した通り、高速・高効率に光格子中に分子を生成する新しい手法の開発を行ってきた。その結果、その手法が有効に働き、実際に原子温度を BEC 相転移温度付近まで冷却することに成功した。現在すでにその冷却限界を制限している要因の特定とその対策は始めており、近いうちに原子の BEC を生成できると考えている。

BEC 生成後は、光格子の断熱的操作によって誘起される超流動—Mott 絶縁体相転移を利用して、光格子の 1 サイト当たりの原子数が 2 個になるサイトの数を可能な限り多くし、その中で原子を会合させて分子を生成する。この手法によって、これまでになく高速に、かつ多数の分子を生成できると考えられる。

生成した分子に対して、STIRAP と呼ばれる断熱的な誘導ラマン遷移を適用して、電子・陽子質量比の検証実験に適した準位へと、内部状態を遷移させる。そこでマイクロ波遷移によって、分子の精密な分光実験を行う。分子は光格子にトラップされているため、拡散による測定時間の制限がなく、狭線幅な分光実験が実現される。この分光実験を断熱的に 1 年単位で続けることによって、高精度な電子・陽子質量比の恒常性検証を行っていく。

他方で、BEC 転移付近の温度まで冷却された原子に対して、磁場を用いて Efimov 状態と共鳴させ、Efimov 状態(3 原子分子状態)を生成する。Efimov 状態は 100us ほどの寿命を持ち、浅く束縛された 2 原子分子と原子に緩和する。この緩和現象で生成される 2 原子分子をパルスレーザーを用いたイオン化検出法によって高感度に検出し、さらにその振動・回転・スピンといった内部状態についても詳細に調べる。この実験によって Efimov 状態の緩和現象の詳細な研究を進める。

### 4. 自己評価

#### 研究目的の達成状況

本研究の鍵となる技術は、高フィネス光共振器による大きな光増幅機構を使った光格子の生成である。世界的に見ても、そのような実験例は少なかったため、研究計画書段階では、かなり安全係数をかけた計画を立てていた。しかし、実際にやってみると想定以上にうまくいくことが分かり、例えば入射パワーを 1W にする計画が実際は 10mW とわずか 1% のパワーで実験が可能であった。さらに、3 次元光格子での原子のトラップ実験でも非常に大きな原子数をトラップすることに成功した。

このような成功から、より欲張った方向へ計画の軌道修正を行った。計画では BEC 温度まで冷却することなく、高い温度の原子から分子を生成するという効率の低い手法を想定していたが、BEC 温度まで冷却し、より高効率に多数の分子を生成する手法へと変更することにした。多数の分子を生成することは、その後の精密分光や化学反応実験でも大きく有利になる。

この軌道修正は非常にうまくいき、蒸発冷却を用いずに高速・高効率に多数の原子数の BEC を生成するという、全く新しい冷却手法の実現へとつながろうとしている。このような冷却手法の確立は、冷却原子分野全体にとって大きなインパクトを与える重要なものである。

ただし、この軌道修正に加え、新型コロナウイルスの影響や研究期間中に私の異動があった影響で実験が停まってしまう期間が生じたために、精密分光や化学反応実験に取り掛かる時期が遅れてしまった。これらのテーマについては論文の執筆・投稿や、より効率的な研究に向けた理論的考察を進めることで研究を進めてきた。

## 研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

私は、さきがけ採用当初から約 3 年間は専任研究者の立場であり、学生もなく一人で実験を進めてきた。また、完全に何も無い実験室に、1 から実験装置を立ち上げてきた。自己判断としては、人手不足による実験の遅延が生じないように、その影響を最小限に抑え、十分な速度で実験を進められたと考えている。特に重要であったのは、受け入れ研究室であった京都大学量子光学研究室との非常に密接な情報交換であり、細かな技術情報の交換や物理的な議論まで大きなサポートが得られた。また、効率的な研究費の執行の面でも大きな助けとなった。

ただし、2020 年 3 月頃からの新型コロナウイルスの影響や、2020 年 7 月の私の北海道大学への異動による実験状況への影響は非常に大きかった。北大への実験装置の移送も大きく遅延してしましたが、それも新型コロナウイルスの影響を少なからず受けている。全世界的なことであり仕方のないことではあるが、研究の進捗への影響は大きかった。

## 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究で開発してきた、高速・高効率な新しい原子冷却手法については、私自身の研究にとどまらず、冷却原子実験全体にとって重要な研究になると考えている。特に、これまで以上に大きな原子数を用いた実験を高速に行えるようになると考えられる。

冷却原子を用いた実験では、精密分光による基礎物理学実験、量子計算や量子シミュレーション実験、量子計測、極低温化学反応実験など、多数の重要な研究が進められており、これらの研究を大きく増進させることが期待される。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 4件

1. **Jun Kobayashi**, Atsushi Ogino and Shin Inouye, “Measurement of the variation of electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules produced from laser-cooled atoms”, Nature Communications 10 3771 (2019). [プレスリリースにより科学新聞 1 面といくつかの Web ジャーナルへ掲載された。]

原子・分子のエネルギー構造は、微細構造定数や電子・陽子質量比といった無次元物理定数によって決定されている。逆に原子・分子のエネルギーを精密に測定することにより、これらの物理定数の恒常性を実験的に検証できる。特に分子の振動・回転エネルギーは電子・陽子質量比に対して敏感に変化する。本研究では極低温分子を用いた精密な分子分光実験を行うことで、電子・陽子質量比の恒常性検証を行い、これまでの常温の分子を用いた検証実験に比べて、5 倍以上高精度な実験に成功した。

2. **Koki Ono**, **Jun Kobayashi**, Yoshiki Amano, Koji Sato, and Yoshiro Takahashi, “Antiferromagnetic interorbital spin-exchange interaction of  $^{171}\text{Yb}$ ”, Phys. Rev. A 99, 032707 (2019)

Yb や Sr などの原子は、基底状態の  $1S_0$  状態と準安定状態の  $3P_0$  が共に  $SU(N)$  対称性を持つ。このような特殊性を生かした近藤効果の量子シミュレーションが提案されていた。ところがそのためには  $1S_0$  と  $3P_0$  の間に、反強磁性的相互作用が必要である。それまでの実験が

ら 87Sr と 173Yb では強磁性的であることが知られていた。本研究では、171Yb 原子の狭線幅分光実験で、反強磁性的であることを見出した。今後近藤効果の量子シミュレーション実験へつながることが期待される。

3. Yusuke Nakamura, Yosuke Takasu, Jun Kobayashi, Hiroto Asaka, Yoshiaki Fukushima, Kensuke Inaba, Makoto Yamashita, and Yoshiro Takahashi, “Experimental determination of Bose-Hubbard energies”, Phys. Rev. A 99, 033609 (2019)

近年、光格子中の冷却原子を使った Bose-Hubbard モデルのシミュレーションの研究が盛んに行われている。本研究では Yb 原子の狭線幅な光学遷移(1S0-3P2)を用いることで、光格子内の原子数分布の直接的な観測を実現し、Bose-Hubbard ハミルトニアンエネルギーを実験から決定することに成功した。さらに、超流動—Mott 絶縁体相転移における粒子数分布とエネルギー変化について、理論計算も含めた考察を行った。

## (2) 特許出願

研究期間累積件数: 0件 (特許公開前のもも含む)

## (3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

### プレスリリース 1 件

上記の原著論文 [JK et al., Nat. Commun. 10 3771 (2019)] の成果についてプレスリリースを行い、科学新聞 1 面といくつかの Web ジャーナルへ掲載された。

### 招待講演 4 件

会議名 International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020)

場所 大分県別府市

日時 2020年1月

タイトル “Research on ultracold few-atomic molecules using ionization detection”

会議名 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020)

場所 理化学研究所 和光キャンパス

日時 2020年1月

タイトル “Test for the stability of the electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules”

会議名 日本物理学会第75回年次大会 (シンポジウム)

場所 現地開催中止(名古屋大学 東山キャンパス)

日時 2020年3月

タイトル “レーザー冷却技術による極低温2原子分子の生成と応用”

会議名 JST さきがけ「光極限」公開セミナー

場所 北海道大学

日時 2019年10月

タイトル“レーザー冷却技術を用いた基礎物理定数の不変性検証実験”