

戦略的創造研究推進事業
ERATO
追跡評価用資料

「上田マクロ量子制御」プロジェクト
(2005.9～2012.3)

研究総括: 上田 正仁

2018年3月

目次

| | |
|---|----|
| 要旨 | 1 |
| プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況(まとめ図) | 3 |
| 第1章 プロジェクトの概要 | 4 |
| 1.1 研究期間 | 4 |
| 1.2 プロジェクト発足時における科学技術や社会の背景 | 4 |
| 1.2.1 科学技術の背景 | 4 |
| 1.2.2 社会の背景 | 5 |
| 1.3 プロジェクトのねらい | 5 |
| 1.4 研究体制 | 5 |
| 1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義 | 6 |
| 1.5.1 極低温における、異種原子よりなる極性分子の生成(相互作用制御グループ) | 6 |
| 1.5.2 単一原子が持つスピン状態の観察、修復、制御(不確定性制御グループ) | 8 |
| 1.5.3 フェルミ原子による BEC の研究(強相関量子制御グループ) | 12 |
| 第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況 | 19 |
| 2.1 各研究テーマの終了後の状況に関する基礎データ | 19 |
| 2.1.1 調査方法 | 19 |
| 2.1.2 競争的研究資金の獲得状況 | 20 |
| 2.1.3 論文の発表状況 | 29 |
| 2.1.4 特許の出願・登録状況 | 34 |
| 2.1.5 招待講演 | 34 |
| 2.2 各研究テーマの進展状況 | 36 |
| 2.2.1 相互作用制御の研究 | 36 |
| 2.2.2 不確定性制御の研究 | 38 |
| 2.2.3 強相関量子制御の研究 | 40 |
| 2.3 プロジェクト参加研究者の活動状況 | 46 |
| 2.4 2章のまとめ | 46 |
| 第3章 プロジェクトの成果の波及と展望 | 49 |
| 3.1 科学技術への波及と展望 | 49 |
| 3.1.1 研究成果の科学技術への展開状況と期待 | 49 |
| 3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成 | 50 |
| 3.1.3 科学技術への波及のまとめと展望 | 50 |
| 3.2 社会経済への波及と展望 | 50 |
| 3.2.1 人材育成 | 50 |
| 3.2.2 冷却原子技術の応用 | 51 |
| 3.2.3 社会経済への波及のまとめと展望 | 51 |
| 【引用文献】 | 52 |

要旨

冷却原子気体(冷却原子)の物理は、1980年代後半にレーザー冷却技術が確立されて、温度が 10^{-5} - 10^{-7} K という極低温に達し、予言されていたボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)が1995年に成功したこと(いずれもノーベル賞受賞)により、世界の多くの研究機関で取り上げられるようになった。そして物理学のフロンティアの一つとして世界の若手研究者が多く参画する分野になっている。

冷却原子系は極低温においては、BECに代表される量子力学的効果が強く現れ、超伝導と同じ機構で起こる超流動やその他の興味深い現象が現れる。さらに、現象を引き起こす条件を自由に変化させながら研究できるため、冷却原子系で得られる情報は、高温超伝導等の発展に寄与できる可能性が期待される。

世界の冷却原子の研究機関は数十人規模で研究を進めているのに対して、日本ではその研究規模と研究費において、特に優れた若手研究者が苦勞している状況であった。BECの理論家である上田はこの状況に危惧を抱き、優れた若手研究者をグループリーダーとする実験研究を柱に立ち上げたのが本プロジェクトである。プロジェクトは3つの実験グループを主体に、それを支援・リードする理論グループで運営され、世界的な成果を目指す中で若手の実験研究者の育成を図った。実験グループは、「相互作用制御」、「不確定性制御」、「強相関量子制御」の3グループ構成とし、全ての実験設備をゼロから立ち上げ、短時間で世界的な水準の研究を可能にした。「相互作用制御」グループでは、光会合によるKRbの基底状態の分子生成を実現し、「不確定性制御」グループでは、高Q微小共振器(QED)中で単一Yb原子の持つ核スピンの射影測定を初めて測定し、それを発展させて、核スピンの密度行列の推定に成功した。「強相関量子制御」グループでは、BEC-BCSのクロスオーバー領域において転移温度を測定し、さらにユニタリー極限において、普遍的熱力学関数の決定に世界で初めて成功した。また、フェルミ原子 ${}^6\text{Li}$ のp波分子を生成することに成功するなど、それぞれが優れた成果を挙げた。

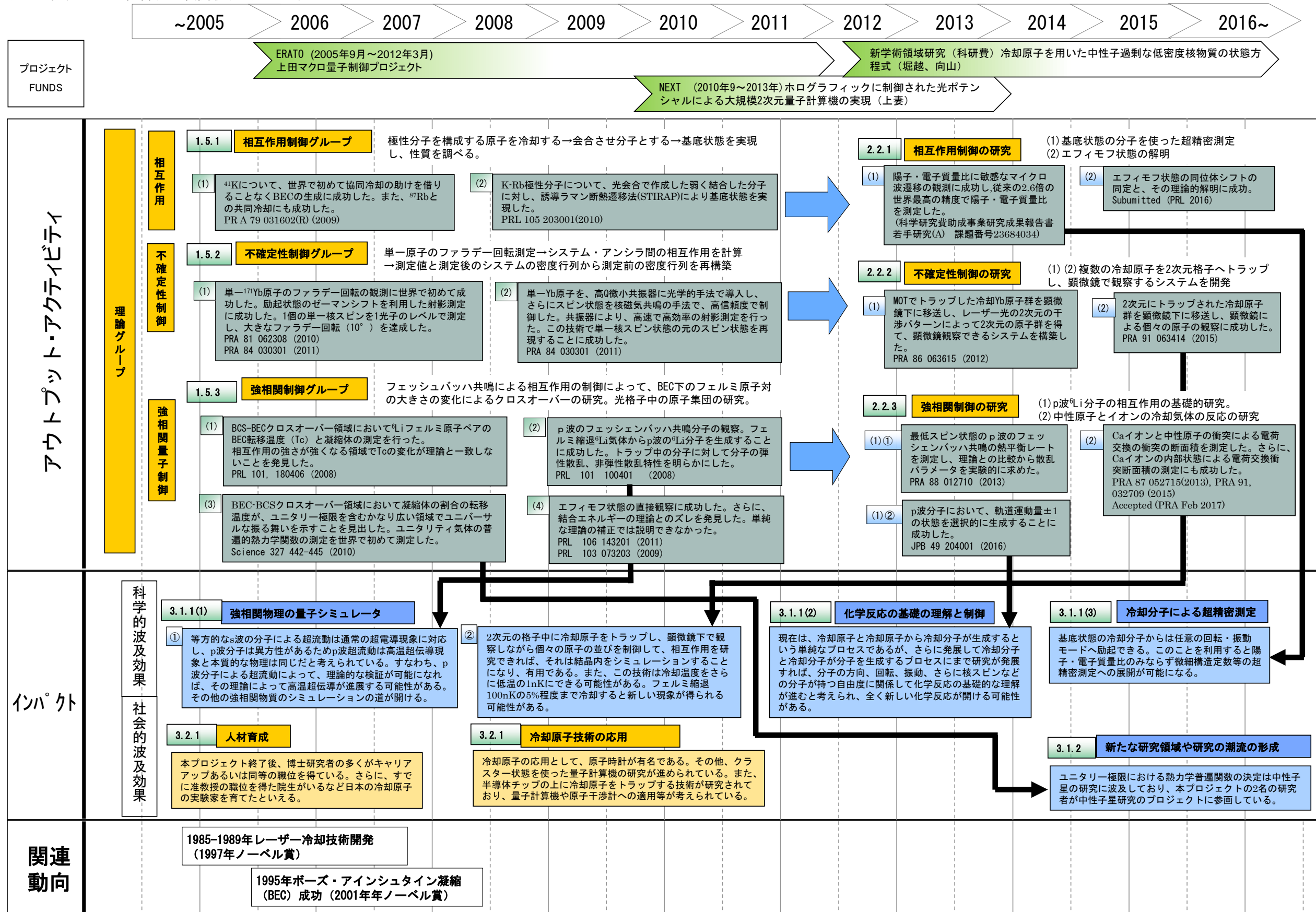
本プロジェクト終了後、「相互作用制御」の研究は、生成した冷却分子を使った陽子・電子質量比の精密測定において、世界最高精度を達成した。また、エフィモフ状態の同位体シフトの同定と、理論的に解明に成功した。「不確定性制御」の研究は、複数の冷却原子を2次元のトラップに捕捉し、顕微鏡で観測できる設備を完成させ、2次元配列した冷却原子の相互作用を測定できる体制を築いた。「強相関量子制御」の研究は、p波の分子のBECを目指した研究を継続しており、p波分子の散乱因子を決定し、さらに選択的な軌道運動量状態の生成に成功した。また、中性原子とイオンの同時冷却に成功し、中性原子とイオンの間の電子交換への研究展開、イオンから原子への電荷移動の観測、その後、イオンの励起状態毎の衝突断面積の測定に成功した。

異分野への発展として、ユニタリー極限の物理は、中性子星の研究に波及しており、中性子星研究のプロジェクトの中で研究が継続している。また、冷却原子によるシミュレーションの研究が進めば、高温超伝導を代表とする強相関物質の研究に、大きく貢献することが期待されている。

冷却原子物理の応用としては、原子時計がある。その他、量子コンピュータやアトムチップが試みられており、冷却原子自体の研究はそのような研究を推進・実用化するための基礎

研究と位置づけられる。このプロジェクトにおいて、多くの若手研究者がキャリアアップして活躍しており、社会的な意義も認められる。

プロジェクトの発足に至る経緯及び展開状況（まとめ図）



第 1 章 プロジェクトの概要

1.1 研究期間

ERATO 研究期間：2005 年 9 月から 2012 年 3 月
(特別重点期間(2011 年 4 月から 2012 年 3 月)を含む)

1.2 プロジェクト発足時における科学技術や社会の背景

1.2.1 科学技術の背景

原子の極低温冷却技術は、1980 年代後半にレーザー冷却が発明された結果、革命的な進化を遂げ、従来の断熱消磁法で得られる 1mK 程度から(原子種に依存するが) μ K 程度の低温まで冷却できるようになった。その結果、冷却原子気体の物理が一気に進展することになった。その後、蒸発冷却技術により 100nK 程度の温度に到達し、理論的に存在が予言されていたボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現した(1995 年)。これらの成果に対して、レーザー冷却は 1997 年に、BEC の実現は 2001 年にノーベル賞が授与された。

BEC を含む冷却原子気体には以下の様な特長がある。

- BEC に代表されるマクロな量子性
- 低温原子に特有な様々の相互作用制御
- 光格子を使った結晶格子の実現

冷却原子気体の実験系は、上記 3 項目を高い操作性をもって実現できるため、非常に魅力的な系である。冷却原子(BEC 状態を含む)を光格子にトラップした系において、光格子のポテンシャルが小さい時には超流動相が、大きい時にはモット絶縁体相が現れることから有用性が明らかとなった。現在、冷却原子気体は凝縮系の物理探求のための理想的な系であると考えられている。

この分野の日本の研究は、日本のオリジナルである、集団冷却された原子による光格子原子時計が、次世代の時間標準の有力候補の一つとなるなど健闘しているが、世界のトップ研究集団に比べて、全体としての研究の規模や広がりにおいて課題があった。例えば、米国の JILA は JILA 物理フロンティアセンターを設立し、そのなかで冷却原子のグループが 3 つ(実験 2 グループ、理論 1 グループ)活動している。最も規模の大きい実験グループでは、ポスドクが 9 名、大学院生 17 名で構成され、2014 年に 15 報の論文が発表されており、その平均著者数は 8 人であった。欧州でも、この分野について大規模な研究が行われている¹。一方、日本においては、光格子原子時計という例外はあるが、冷却原子の物理を追求するのに十分な規模をもつ研究組織はなかった。

この分野は、量子力学の本質を追求する研究だけでなく、高温超伝導に代表される強相関物質のシミュレーションや、化学反応の基礎となる現象の追求や、量子コンピュータの実現等を視野にいたした物理学のフロンティアの一つであり、世界では急速に研究が進展していた。

¹ 欧州の状況として、例えば、フランスの高等師範学校の援助を受けたカスラー・ブロッセル研究所が大規模の研究を行っている。(http://www.lkb.ens.fr/Kastler-Brossel-Laboratory)

1.2.2 社会の背景

冷却原子の研究では、研究設備そのものが比較的高額(数千万円から1億円程度)であり、且つ、研究の性格上、研究設備の併用、共用ができない。さらに、新しい研究分野であるため、比較的若手の研究者が中心であった。このため、若手研究者にとっても、大学等の研究機関にとっても負担が大きかった。一方、この分野の研究の進展は速く、国際的な激しい競争になっていた。

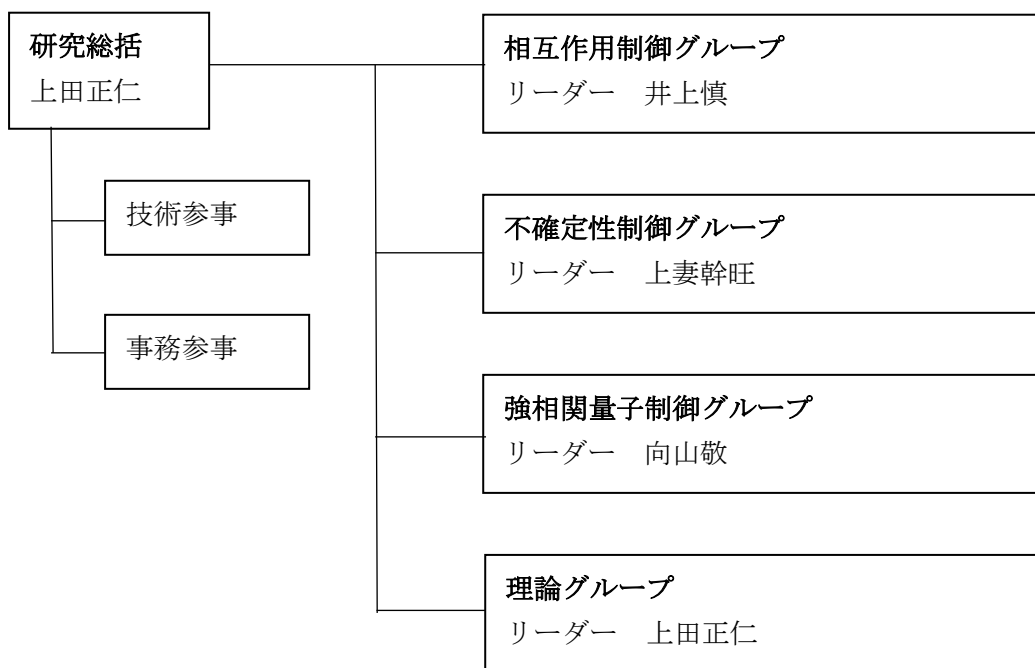
科学技術に対する社会からの支援として、各種の研究資金援助の制度が設けられて、多くの研究はこれらの研究資金に支えられ、大きな問題はなく研究が進んでいたが、この分野においては、若手研究者を支援する研究資金は額が少ないため、研究設備を整備することができず、冷却原子研究の世界的な競争において、わが国が遅れを取ることに懸念されていた。

1.3 プロジェクトのねらい

当該分野において、海外で顕著な業績を挙げた若い実験家が、帰国後、実験設備も整備できず。孤軍奮闘しているような状況に鑑み、本プロジェクトではそのような若い実験家を迎え、日本における研究集団を立ち上げ、世界に情報発信をすることを大きな目的とした。本プロジェクトでは、米国等で成果を挙げた3人の若手実験家をグループリーダーとし、新たな実験装置を立ち上げることで、実験主体の研究を、理論家である上田が研究総括として運営した。研究総括のもと、3つの実験グループ、すなわち分子生成と制御を目的とした相互作用制御グループ、原子スピン状態の観察、修復および制御の技術を目的とした不確定性制御グループ、強相関係の物理を明らかにすることを目的とした強相関量子制御グループ、そしてこれらの実験グループを支援し、議論し、方針を導く理論グループで構成された。グループ間の緊密な交流と議論によって、研究者各人が全体を把握することを重視し、プロジェクト全体は一カ所に集まって実施された。従来のERATOとは異なって、理論家である研究総括が実験家を率いて実験主体の研究を行う変則的な運営プロジェクトと言える。本資料では、研究成果とその展開・波及効果をまとめた。

1.4 研究体制

前述したように、本プロジェクトでは、研究総括のもと、3つの実験グループと1つの理論グループを置き、3つの実験グループは同一の場所で実験を行い、理論グループは実験グループを支援する形で参画した。それぞれの実験グループのリーダーには若手を抜擢し、実験設備はゼロから製作し、設備を立ち上げて研究が行われた。本プロジェクトにおける体制図を下記に示す。



1.5 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義

本プロジェクトは、理論家がリーダーとなって実験主体の研究を行う、新しい形態のプロジェクトであり、世界のトップグループと比肩する下記の成果を挙げるとともに、優秀な実験家を多く育てた。

1.5.1 極低温における、異種原子よりなる極性分子の生成(相互作用制御グループ)

分子そのものをレーザー冷却することは、一般的に困難とされている。従って、分子を構成する原子を冷却し、冷却原子を近づけて分子にする方法を採用した。相互作用制御グループの研究目標は、極低温に冷却した異種の極性分子を生成し、その基底状態を実現し、性質を調べることであり、以下の成果が得られた。

(1) ^{41}K と ^{87}Rb の異種原子(両方共ボゾン粒子)、それぞれをレーザー冷却し、ゆるく結合した冷却分子を作ること成功した。

(2) 作成した冷却分子を、基底状態(本当の分子で分子内の振動、回転エネルギーが最小の状態)にすることに成功した。

下記に、それぞれの成果の概要を記述する。

(1) 2つの異種原子(^{41}K と ^{87}Rb)を分子にすることに成功

実験に先立ち、どの原子種を選択するか判断は極めて重要であった。すなわち、ボゾンかフェルミオンか、原子種のスペクトルデータが分かっているかどうか、実験上の困難が起こる可能性等が判断のポイントであった。しかし、これらのポイントすべてが実験前に判明していることはない。その上、実験途中で原子種を変更するためには、使うレーザーをすべて変更し、数百に上る光学部品を使った光学系の調整も行わなければならない。実際上、原子種を簡単に変更することはできない。そのため、冷却原子の実験において原子種を選択にはリスクが伴う。

相互作用制御グループでは、慎重に検討し、 ^{41}K (ボゾン)と ^{87}Rb (ボゾン)の組み合わせを選択した。 ^{41}K は冷却原子としては未知の原子であったが、 ^{41}K の単独蒸発冷却により BEC を達成し、同じ真空槽内での ^{87}Rb との同時 BEC にも成功した^[1]。

冷却した原子を近づけて(会合)分子にする方法として、2つの方法が検討された。すなわち、

①フェッシュバッハ共鳴²

②レーザー光による光会合³

である。①のフェッシュバッハ共鳴による方法は、冷却原子の分野では一般的によく行われる方法である。 ^{41}K と ^{87}Rb の原子種は両方ともボゾンであり、3体会合する確率が高く、光格子の各サイトに K 1 個、Rb 1 個ずつトラップして、フェッシュバッハ分子の生成を目指した。分子の生成には成功したが、その寿命は短く、基底状態へ遷移させることはできなかった。一方、②のレーザー光による光会合については、磁気・光学トラップ(MOT)にトラップした原子の光会合分子の生成に成功した。

(2) 光会合した ^{41}K と ^{87}Rb 分子の基底状態への移行^[2]に成功

フェッシュバッハ共鳴分子や、光会合による分子は、そのままではまだゆるく結合した分子であり、本当に強く結合した分子ではない。また、分子内部の自由度、すなわち振動や回転の運動のエネルギーも持っている。光会合した分子を、強く結合した分子の振動や回転のエネルギーが最小の基底状態へ移行させることができれば、基底状態でレーザー光により任意のエネルギー準位へ励起できる。すなわち、任意の振動、回転運動の励起、また電子状態を任意のエネルギーレベルへ励起することも可能であるので、分子の状態を自由に制御できる、重要な研究対象となるからである。

光会合した分子を基底状態へ移行させるために、誘導ラマン散乱断熱遷移(STIRAP)を使った。その原理を図 1-1 に示す。基底状態を $|2\rangle$ とする時、光会合の状態 $|1\rangle$ よりも高いエネルギーの中間状態 $|3\rangle$ を使うことによって、レーザー光を使って光会合状態 $|1\rangle$ から基底状態 $|2\rangle$ へ、誘導的に(熱を発生することなく)移行させることができる。この時、中間状態 $|3\rangle$ と基底状態 $|2\rangle$ の差分のエネルギーのレーザー光(図 1-1 では 641nm 青)(誘導光)を先に照射し、その光を弱くし、中間状態 $|3\rangle$ と光会合状態 $|1\rangle$ の差分のエネルギーのレーザー光(875nm 赤)(励起光)を強くしてゆくと、光会合状態から基底状態へ、100%近く分子を移行させることができる。実際に分子の移行を測定した結果を図 1-2 に示すが、誘導光を減少させながら励起光の強度を増加することによって、分子の移行が確認できた。

STIRAP を実現するためには、光遷移の経路の選択が重要であるが、選択に際して理論グループが支援し、超微細構造を取り入れた正確な理論計算により、遷移の準位を決定することができた。技術的には非常に線幅の狭い、安定なレーザーを開発することが、基底状態の分子を得る上で重要であった。これは、極低温の振動回転基底状態の分子を全光学的に選択的に生成した、世

² フェッシュバッハ共鳴：多体系中の散乱過程において、ある超微細構造準位にある原子の運動エネルギーと、別の超微細構造準位に属する束縛状態のエネルギーが一致する時に、フェッシュバッハ共鳴が起こる。実験的には外部磁場を掃引することで共鳴を起こさせる。

³ 光会合：光会合とは、二原子が衝突をする際に共鳴する光を照射しておくことで、光を吸収し分子を形成する現象である。

界初の成果である。

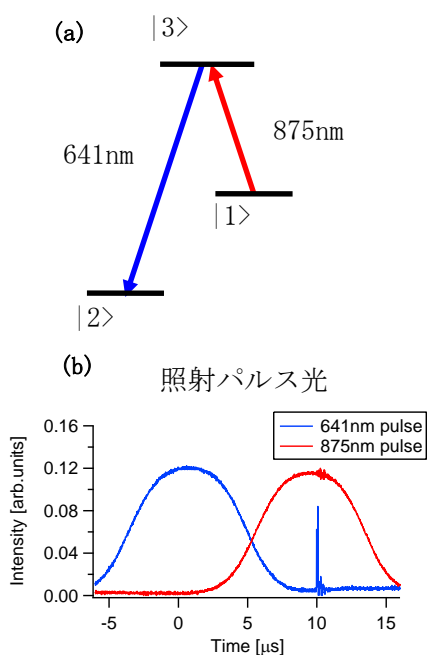


図 1-1 STIRAP による基底状態への移行

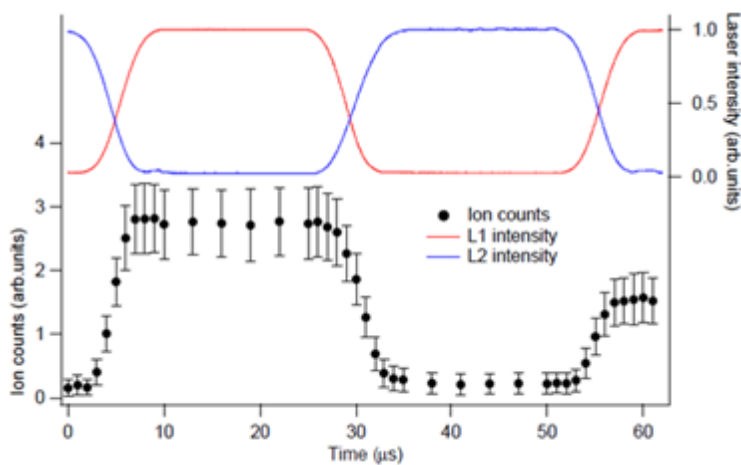


図 1-2 STIRAP による基底状態への移行^[2]

青線：誘導光 赤線：励起光

1.5.2 単一原子が持つスピン状態の観察、修復、制御(不確定性制御グループ)

不確定性制御グループは、冷却原子によるクラスター量子コンピュータ⁴を究極の目標とし、量子系の観察・制御等に伴う不確定性関係に関する理解を深めるための研究を行った。冷却原子として、基底状態において電子スピンの消失し、核スピンの基本単位の $1/2$ のため、核スピンの光子の相互作用を調べるのに適している ^{171}Yb 原子を選んだ。

⁴ クラスターと呼ばれる量子もつれがある集団原子について、一つの原子量子状態を破壊する射影測定を次々行うことによって量子計算を進める量子コンピュータ。

(1) ^{171}Yb 単一原子を高 Q 値微小共振器 (Cavity QED) 中に導入し、単一光子に対して単一スピンの起こすファラデー回転⁵を測定した。さらに、スピンと光子の相互作用の大きさにより、相互作用の小さい弱い測定⁶から、相互作用の大きい強い測定 (射影測定) まで、測定の強度を制御した測定を行った。

(2) QED 中の Yb 原子が持つ核スピンを対象として、単一核スピンの射影技術、および NMR 技術を駆使した測定により、元の量子状態を再現した。

以下の(1)に QED 中での単一スピンが起こすファラデー回転の観測について、(2)に QED 中での NMR 技術を使った非対角要素の測定と密度行列推定について、(3)にその他の成果について、それぞれ概要を記述する。

(1) ^{171}Yb 単一核スピンによる Cavity QED 中の光子ファラデー回転の観測に成功

本測定の模式図を図 1-3 に示す。 ^{171}Yb 原子を MOT 中に保持し、その 7mm 下に z 軸を光軸とする Fabry-Perot 共振器を設置した。z 軸方向に磁場をかけ、励起準位をゼーマン分裂させる。共振器中の原子数を 1 個以下になるように、Yb 原子をトラップから開放し、重力で落下させ下の共振器へと導入する。

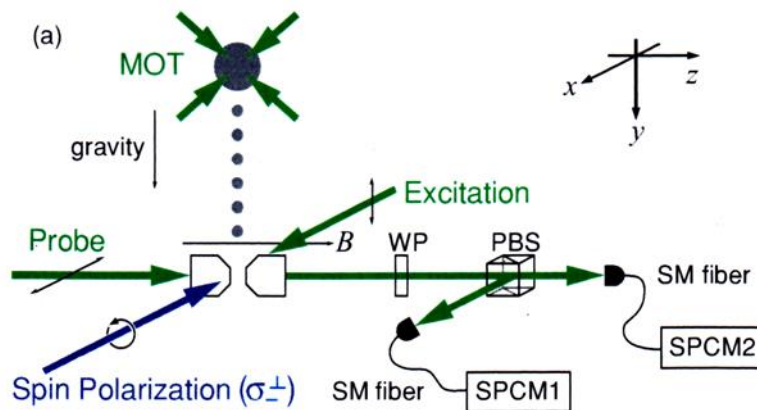


図 1-3 核スピンによる光子のファラデー回転測定の模式図^[4]

図 1-4 において、単一 Yb 原子のゼーマン分裂した励起状態 $|3/2, -3/2\rangle$ から、離調エネルギー δ だけ低い励起光 (Excitation 光) によって、スピン $|\downarrow\rangle$ のみを励起し、再び基底状態に戻る時の発光を測定した。スピンのアップダウンによる発光量のコントラストは 99% で、明確なスピン依存性を確認できた。この単一核スピンに対する実時間射影測定は世界初である。発光を偏光ビームスプリッター (PBS) によって分割し、2 つの光検知器 SPCM1 と SPCM2 を使って発光を検出し、同じ時刻に発光する個数を測定することによって、観察の対象となっている原子が 1 個であることが統計的に確かめられた^[3]。両検知器の発光検出のタイミングが一致する 2 光子の発光は、

⁵ ファラデー効果とは、磁場に平行な直線偏光を物質に透過させたときに偏光面が回転する現象のことである。また、この回転をファラデー回転 (Faraday Rotation) と呼ぶ。(ウィキペディアより)

⁶ 測定の結果、量子状態が変化する。相互作用が小さく、量子状態の変化が小さい測定を弱い測定、変化が大きい測定を強い測定と呼ぶ。強い測定の極限である射影測定では測定対象の量子状態は破壊される。

共振器の中央で強く相互作用している原子とみなし、測定の対象とした。一致する発光を検知すると共に励起光照射を停止し、励起光と同じ波長の Probe 光を z 軸方向から入射し、その光と核スピンの相互作用した Probe 光を、波長板 WP と PBS を介して偏光方向により分離し、2つの検知器 SPCM1 と SPCM2 を用いて、その強度を測定した。波長板 WP に 1/2 波長板を使い、2つの検知器 SPCM1 と SPCM2 の強度の比を測定することによって、Yb 原子の核スピンによる光子のファラデー回転を測定でき、単一の核スピンとしては極めて大きな、 10° 以上のファラデー回転角を得ることができた(図 1-5)。理論グループでは、第 1 原理によるフィッティングパラメータを計算し、共鳴点付近ではファラデー回転角が大きくなるが、吸収も増え、微弱な 1 光子測定では、吸収特性が測定結果に大きな影響を与えることを突きとめた^[4]。

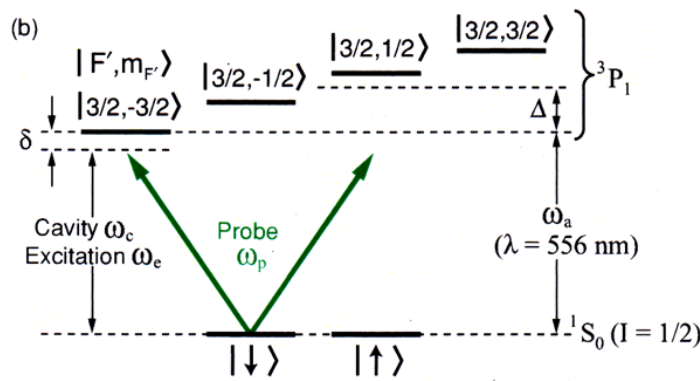


図 1-4 Yb 原子のエネルギー準位と実験に使用した光のエネルギーの関係^[4]

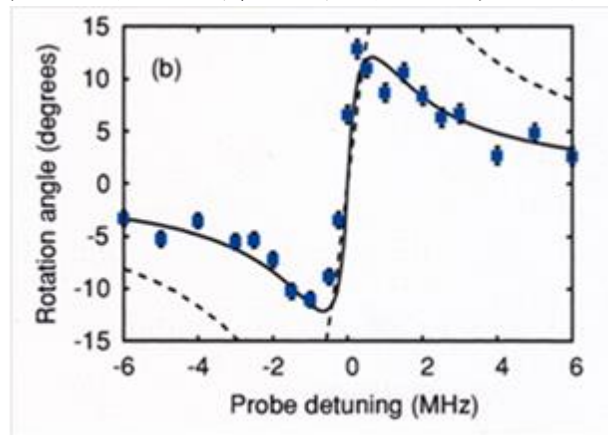


図 1-5 単一原子の核スピンによるファラデー回転の測定^[4]

次に、相互作用の弱い測定から強い相互作用(射影測定)まで、単一光子を検出する際の偏光を調整することにより、スピン状態を測定した(図 1-6)。測定に用いる偏光が入射偏光と 90° の時、射影測定が実現し、それ以外では初期状態に依存した終状態が得られており、弱い測定を実現している。

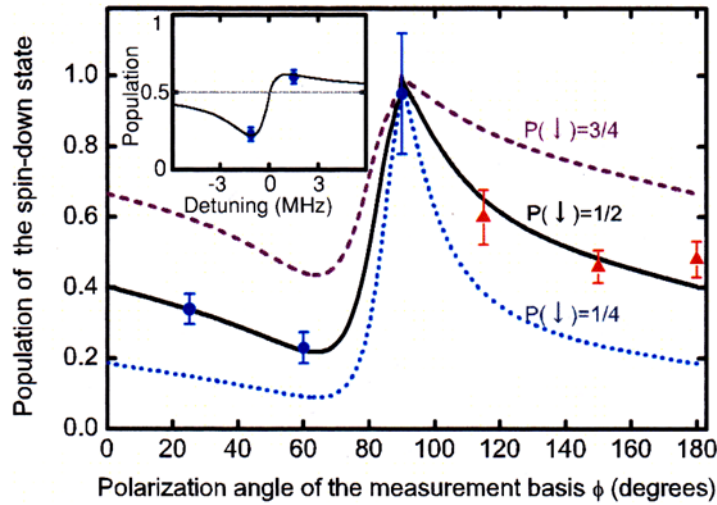


図 1-6 偏光方向によるスピンドウン状態の割合。点線は理論曲線を示す。P(↓)はスピンドウン状態の初期状態を示す^[4]

(2) 単一核スピンの非対角要素の測定と密度行列要素の推定^[5]に成功

前項の実験では、自由落下する原子を用いるため、原子と共振モードとの結合時間が 100μ 秒程度に制限され、核スピンの非対角要素を測定することができなかった。非対角要素を測定するためには、共振器内部に原子をトラップし、NMR の手法で核スピンを回転させる必要がある。その目的のために、共振器内に Yb 原子を移送し、静止させる技術を開発し、共振器の外にコイルを設置し、NMR 測定を行った(図 1-7)。すなわち、MOT と共振器の間に、共振器の波長と異なる光定在波(moving lattice trap)を作り、Yb 原子をトラップした後、光定在波を構成する 2 つのレーザー光の周波数に差を設けることによって、MOT から共振器内へ Yb 原子を移送した。移送と静止は、周波数の差により実時間で制御することができる。

移送の途中で円偏光したレーザー光を照射し

て、核スピンの方向を一定の $|\downarrow\rangle$ 状態にする。コイル 1 による Rabi 振動と、コイル 2 による Ramsey 干渉によって、核スピンの状態を任意の角度へと移行させることができた。その後、前項で述べた射影測定により、3 方向から $|\downarrow\rangle$ 状態を測定し、元のスピン状態を再現することができた(図 1-8)。元の核スピンの状態 3 種類、 $(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ 、 $(|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ 、 $|\downarrow\rangle$ に対して、射影測定から再現した状態が元の状態 3 種類と一致した。

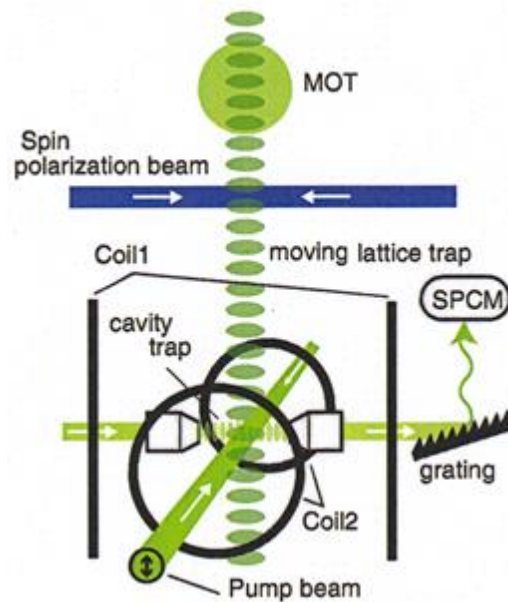


図 1-7 Yb 原子の共振器への移送と NMR 測定実験装置^[5]

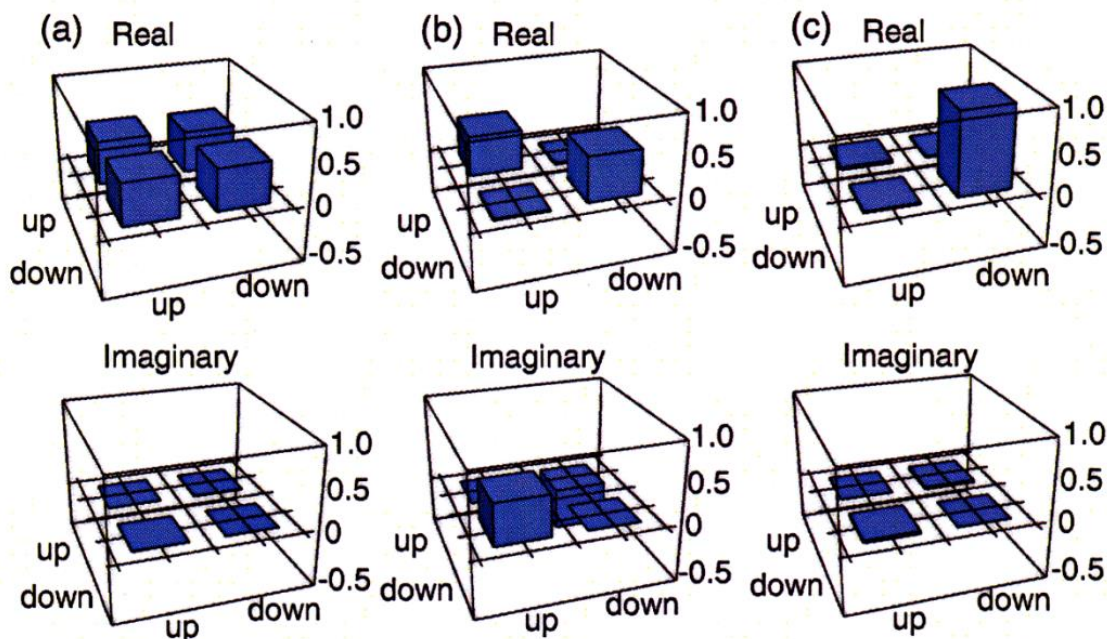


図 1-8 核スピンの射影測定から元の状態を再現した結果。
 (a) $(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) / \sqrt{2}$ 、(b) $(|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle) / \sqrt{2}$ 、(c) $|\downarrow\rangle$ が再現できた^[5]

(3) その他の成果

①核スピンのアップ状態とダウン状態の同時検出に成功

(2)項において、核スピンのダウン状態の蛍光を検出する方法では、蛍光が得られなかったとき、アップスピンのみの状態なのか、そもそも原子が存在しなかったのかの区別ができなかった。ダウン状態の検出を行う実験系に、エネルギー準位 3D_1 へ励起する別のレーザー光を追加することにより、基底状態のダウンスピン、アップスピン状態に対して、それぞれ独立したサイクルの光学遷移が可能で、2モード cavity QED を構築した。その結果、ダウンスピンとアップスピン検出について、平均的な正答率 89% (誤答率 11%) を得た^[6]。

②2次元光格子に閉じ込めた冷却原子を顕微鏡下で観察する系の構築

本プロジェクトの特別重点期間において、複数の Yb 原子を 2 次元光格子中に閉じ込め、閉じ込めた原子を蛍光顕微鏡によって観察する系を構築した。光トラップした原子をソリッドイメージョンレンズの下に運び、トラップされた Yb 原子の寿命を測定し、 ^{174}Yb のボーズ凝縮や、 ^{171}Yb のフェルミ縮退を得るのに、十分長い寿命 (84 秒) であることを確認した。

1.5.3 フェルミ原子による BEC の研究 (強相関量子制御グループ)

固体物理における強相関物理のような、理論的解明が難しい問題を、冷却原子集団をモデル系として研究することを目標とした。その結果、下記の成果を得た。

(1) s 波フェッシュバハ共鳴近傍における BCS-BEC クロスオーバーの観測に成功

- (2)p 波フェッシュバツハ共鳴を利用した p 波分子の実現
- (3)ユニタリーフェルミ気体の普遍的熱力学関数の決定に成功
- (4)エフィモフ状態⁷の観測に成功
- (5)その他

以下にそれぞれの成果について、概要を記述する。

(1) s 波フェッシュバツハ共鳴近傍における BCS-BEC クロスオーバーの測定に成功^[7]

冷却中性原子は、電子系に比べて原子間相互作用が格段に弱く、超伝導など量子凝縮系の理論の構築、検証に極めて有用な系である。この系に、フェッシュバツハ共鳴を適用すると、原子間相互作用を外部磁場によって精度よく制御できる、という利点が生まれる。フェルミ原子において、相互作用の弱い BCS 状態から強い相互作用の BEC 状態までの、広い範囲で研究が可能である。

本研究では ⁶Li フェルミ原子に注目して、冷却により原子数 1×10^6 、温度 100nK を実現した。これはフェルミ縮退状態である ($T/T_F=0.05$ (T_F はフェルミ温度))。さらに蒸発冷却の過程で、フェッシュバツハ共鳴により相互作用が斥力になる磁場を加えることによって、⁶Li₂ 分子 BEC の生成に成功した。その結果、この系は磁場を変えることによって、BCS の状態から BEC の状態まで自由に行き来できる性質を持つことになった。この BCS-BEC クロスオーバー領域において、⁶Li フェルミ原子ペアの BEC 転移温度 (T_c) と、凝縮体の割合の測定を行った。しかし、この測定には次のような問題があった。

- ①BCS-BEC クロスオーバー領域におけるフェルミ原子ペアは、強く束縛された分子的なペアと BCS 的なペアの中間的な性質を持つため、その集団の形状を記述するモデルが存在せず、原子集団の形から温度を評価できない。
- ②BCS-BEC クロスオーバー領域では原子間相互作用が非常に強いため、原子をトラップから開放した後の拡散の様子から、解放前の原子集団の運動量分布を知ることができない。

このような困難のため、従来は BCS-BEC クロスオーバー領域の相図を描く際に、実際の系の温度ではなく、磁場を、原子間相互作用が弱い領域まで断熱的に掃引し、そこでの原子気体が理想的なフェルミ原子気体であるとして、その形から温度を評価していた。

本研究では、急峻な磁場の操作によりフェルミ原子ペアを強く束縛された分子に変換する、プロジェクトンと呼ばれる手法⁸を採用し、分子のブラッグ散乱を用いて運動量分布を測定することによって、温度評価を行った^[7]。図 1-9 に測定の手順を示す。光学トラップと磁場によりフェルミ原子ペアを準備し、時刻 0 で磁場と光学トラップを開放する。磁場の急激な開放により、強く束縛された分子が生成され、その直後にブラッグ散乱のためのパルスを与え、その後、フェッシュバツハ共鳴による斥力が働くようにゆっくり磁場を加え、再び磁場を切り、原子集団の画像を得る。得られた画像と一次元プロファイルが、図 1-10 の (a)、(b) である。図 1-10 (a) はブラッグ散乱がない場合、図 1-10 (b) はブラッグ散乱 (主ピークの横にある低いピーク) がある場合

⁷ フェッシュバツハ共鳴近傍のような原子間の二体の相互作用が共鳴状態にあるところでは、エフィモフ状態と呼ばれる束縛エネルギーが無限の等比級数をなす三体束縛状態が出現することが知られている。

⁸ 分子間の弾性衝突の時間よりも速く磁場を変化させれば、磁場操作後の分子の運動量分布は元のフェルミ原子ペアの重心の運動量分布に一致するとの仮定に基づく。

である。ブラッグ散乱のピークの高さから、分子の数を見積もることができる。図 1-10(c)に、トラップ深さを変えてブラッグ散乱画像から見積もった散乱分子数を示した。黒い矢印のところで分子が急に多くなった点が、BEC 転移温度 T_c である。図 1-10(d)に、 $T < T_c$ の場合の典型的なブラッグ周波数と散乱分子数の関係について、実験結果と理論から求めた曲線を示した。ボーズ・アインシュタイン分布を仮定し、相互作用の強さを表す無次元の量 $(k_F a)^{-1}$ に対して、トラップ周波数と画像から得られた原子数を使って求めたフェルミ温度 T_F と T_c の比 T_c/T_F を示したのが図 1-11 である。 $1 < (k_F a)^{-1} < 3$ の領域では、弱く相互作用するボーズ気体の理論(実線)で転移温度を説明できる。しかし、 $(k_F a)^{-1} < 1.0$ で理論曲線と実験値が離れていき、 $(k_F a)^{-1} < 0.6$ の領域では、 T_c が相互作用の大きさによらず一定値になることを見出した。この結果は、実験的にも理論的にも確認されていない新規な結果であり、クロスオーバーの理論や実験に、大きな影響を与える可能性がある。

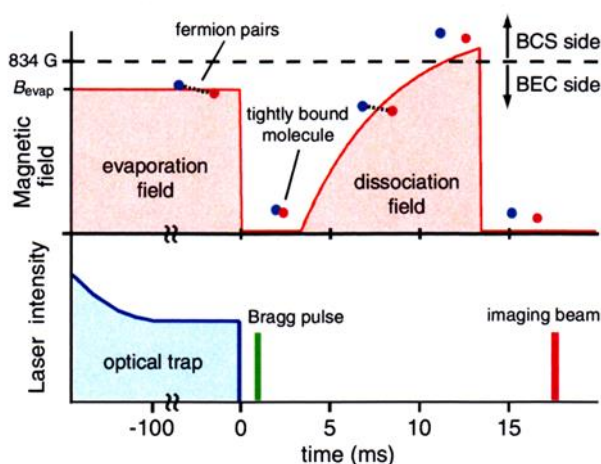


図 1-9 BCS-BEC クロスオーバー測定の手順^[7]

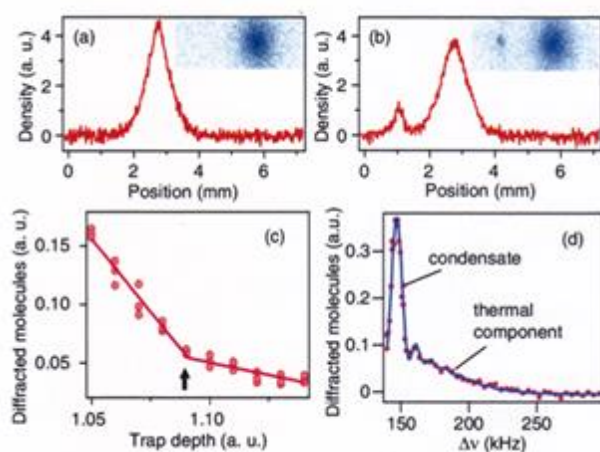


図 1-10 得られた原子集団のブラッグ散乱と分子数 (a)ブラッグ散乱なし、(b)分子によるブラッグ散乱、(c)トラップ深さに対する分子数、(d) $T < T_c$ における散乱分子数とブラッグ周波数の関係^[7]

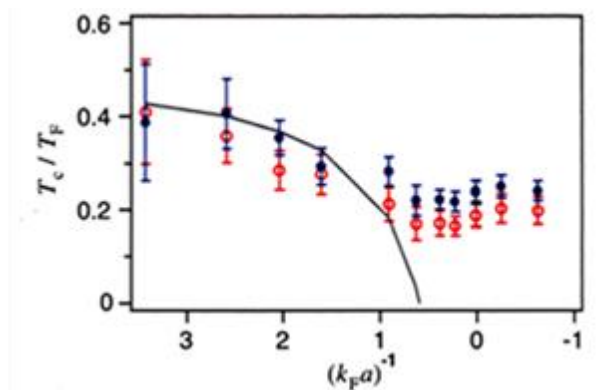


図 1-11 $(k_F a)^{-1}$ に対する T_c/T_F の分布。実線はボーズ・アインシュタイン分布を仮定した理論曲線^[7]

(2) p 波フェッシュバッハ共鳴を利用した p 波分子の実現^[8]

フェルミ冷却原子の p 波、あるいは d 波の超流動は、高温超伝導のモデルになると考えられている。フェルミ冷却原子の p 波超流動の実現の第 1 歩として、p 波分子の生成を実現した。フェッシュバッハ共鳴による p 波分子の生成の研究は、原子種 ^{40}K や ^6Li で多く行われたが、フェッシュバッハ共鳴の幅が狭いために、その実現が困難であった。本研究では磁場生成のための電流を安定化することによって、10mG 程度の磁場安定度を実現しただけでなく、磁場をフェッシュバッハ共鳴に近づける際の掃引速度等のパラメータを調整した。

図 1-12 に、分子生成までの操作と、得られた分子観測画像を示す。図 1-12(a) で示すように、磁場をフェッシュバッハ共鳴の磁場まで下げていき、共鳴磁場に達したら、次に原子に対する共鳴光 (blast light) を使ってペアを作らなかった原子を除去する。除去後に磁場を上げ (図 1-12(b) (c))、共鳴磁場を保ち (図 1-12(d))、共鳴磁場より下げた (図 1-12(e)) 時の分子の状態を示す。図 1-12(b) (c) では、分子が原子へと離散しており、図 1-12(d) (e) では、分子が生成した状態が検知されており、ペアを作っていない原子は存在しない。図 1-12(f) は、そもそも原子がない状態である。

さらに、トラップ中に保持された分子の寿命測定に成功した (図 1-13)。図中、赤丸は分子のみがトラップ中に存在する場合の原子数の減少、青丸は分子に変換されずに残った原子が存在する場合の減衰をそれぞれ示し、分子に変換されずに残った原子の存在により、減衰が早いことが分かった。これらの実験結果と、さらにエネルギー的に高いスピン状態を使った p 波分子の生成の実験結果から、分子間衝突と原子分子間衝突の係数と、双極子ロス係数を決定した。

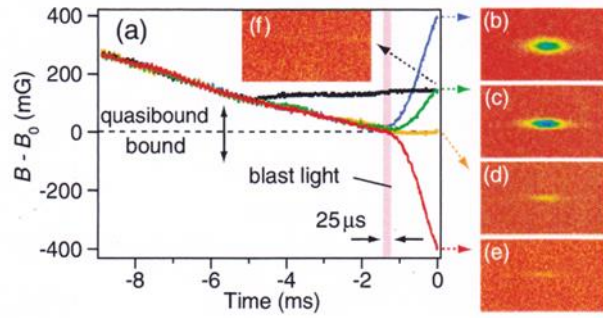


図 1-12 磁場操作による分子生成までの手順と得られた分子観測画像^[8]

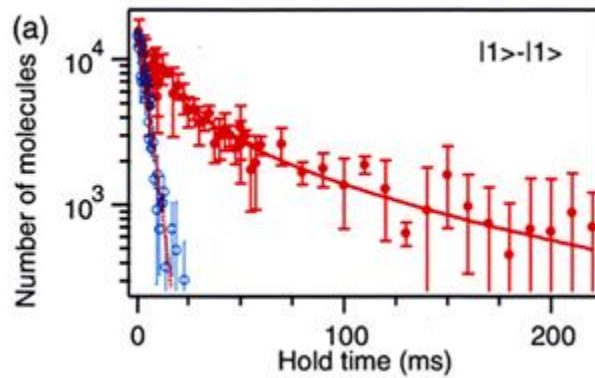


図 1-13 赤丸はトラップ中に分子のみ、青丸はペアを作らなかった原子が存在する場合の原子数の減衰^[8]

(3) ユニタリーフェルミ気体の普遍的熱力学関数の決定^[9]に成功

冷却原子気体の熱力学は、一般に温度 T 、密度 n 、粒子間相互作用を表現する散乱長 a_s の 3 つのパラメータで表現される。散乱長 $a_s=0$ は、相互作用が無い理想気体を表している。そして散乱長 a_s が無限大に発散する状況が、ユニタリー極限である。ユニタリー極限においては、散乱長 a_s という長さは熱力学的な表現から消えて、温度 T とフェルミ温度 T_F ($\sim n^{2/3}$) のみで、熱力学的特性を表現できる。すなわち、 $\theta(n) \sim T/T_F(n)$ と置くと、内部エネルギー $f_E(n)$ を $\theta(n)$ の関数で表すことができる。しかし、具体的にどのような熱力学的関数になるかは不明であった。さらに冷却原子系においては、その密度と温度が均一ではないという問題もある。

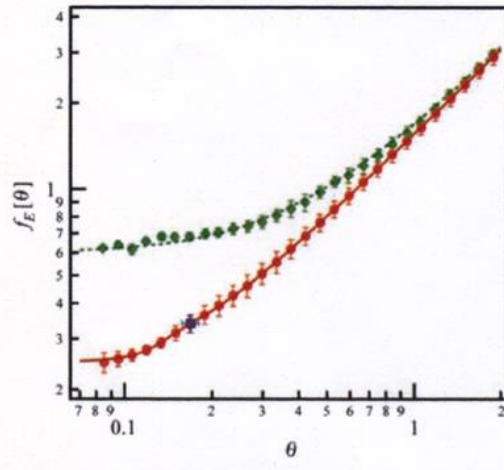


図 1-14 $\theta \sim T/T_F$ に対する内部エネルギー f_E ^[9] 緑線・赤線はそれぞれの理論曲線

そこで、熱的平衡状態で、位置 r の圧力 $p(r)$ は、内部の拡散の力と外部の調和関数ポテンシャルトラップからの拘束力との平衡によって決まる、と考えて定式化し、測定された密度分布

$n(r)$ と、ポテンシャルの形状から、位置 r を変数とする圧力分布 $p(r)$ を決定した。位置 r での圧力 $p(r)$ と $n(r)$ から、 $f_E(\theta)$ を求めることができる。実際、トラップの中央では密度が高く、トラップの端では密度が低いので、位置 r に対応して、 θ を広い範囲で測定することができる。 ${}^6\text{Li}$ 原子での測定結果を図 1-14 に示す。相互作用が無い理想気体(緑)と、相互作用が非常に大きくなったユニタリー状態(赤)の内部エネルギー $f_E(\theta)$ の実験結果は、理論曲線とよく一致している。

(4) エフィモフ状態の観測に成功

エフィモフ状態とは、3 体が弱く結合した状態であり、原子核の内部の状態として 1970 年に V. Efimov により予言された。冷却原子系においては、エフィモフ状態のエネルギーが束縛されていない 3 原子のエネルギー準位と交わる点、あるいは 2 原子分子と原子の混合状態のエネルギー準位と交わる点が、これまで多くの研究グループにおいて研究されてきた。しかし、エフィモフ状態の直接の観測に成功したグループはなかった。

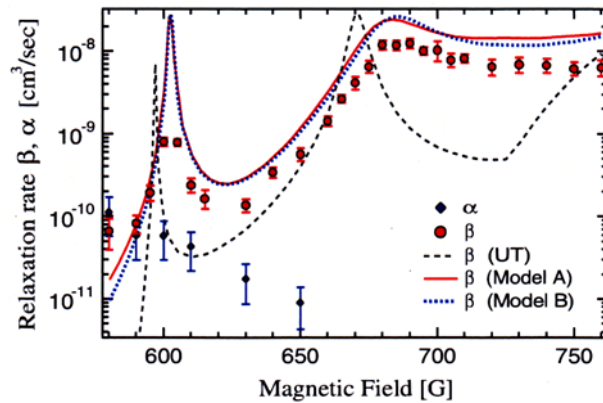


図 1-15 エフィモフ状態の観測^[10]

この研究では ${}^6\text{Li}$ 原子の 3 つの異なる 2 原子の結合状態 ($|12\rangle$ 、 $|23\rangle$ 、 $|31\rangle$) (フェッシュバッハ共鳴による分子) と、1 個

の原子の組み合わせによるエフィモフ状態の観測を行った。分子状態とエフィモフ状態が交わる点では、原子分子間の非弾性衝突レートが増大することが知られており、明瞭な原子の損失レートの増大として、エフィモフ状態と分子状態の交点を決定することに成功した(図 1-15)^[10]。赤の点が分子-原子の衝突による損失レート、青の点が分子-分子による損失レートである。分子-原子状態(エフィモフ状態)の損失が大きくなる点(ピーク)(600G と 685G) が測定できた。破線(黒)はユニバーサル理論による理論曲線、点線(赤・青)はそれに補正を施した理論曲線である。実験との比較から、ユニバーサル理論に補正を施す必要があることがわかった。

さらに、前述の実験結果を用いて、 $|12\rangle$ 分子と $|2\rangle$ 原子の混合系から出発して、 $|2\rangle$ 原子を $|3\rangle$ ヘスピンフリップする RF を照射して、その後に $|2\rangle$ に残っている原子数を測定した(図 1-16)^[11]。単純な原子のスピフリップの共鳴に対応する信号(図 1-16 中、RF82.62MHz 付近の大きな谷)の他に、エフィモフ状態の生成に起因する共鳴(図 1-16 中、RF82.5MHz 付近の小さな谷)も観測した。

磁場を変えながら(すなわち、フェッシュバッハ共鳴による分子の結合エネルギーを変化させながら)、エフィモフ状態の結合エネルギーを示す共鳴周波数を測定した結果を図 1-17 に示す。赤紫の実線(Trimer(theory)と表示)は 3 体のエフィモフ状態について、3 体のパラメータのエネルギー依存性が単調に変化するとした補正を施した理論曲線である。この実験結果から、補正を施したにも関わらず、実験と一致しておらず、さらに複雑な補正が必要であることが分かった。実験に先立ち、エフィモフ状態の理論的解析を行い^[12]、低磁場状態では 2 分子状態の補正が重

要であることを指摘し、実験結果を定量的に説明することに成功した。

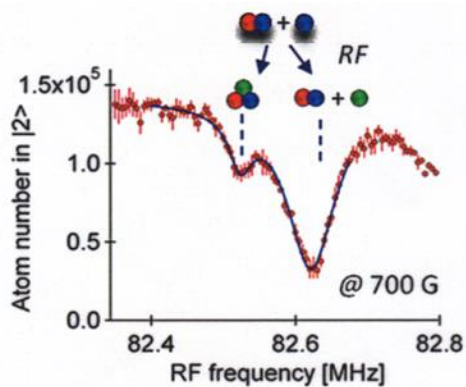


図 1-16 エフィモフ状態の生成に起因する共鳴⁹

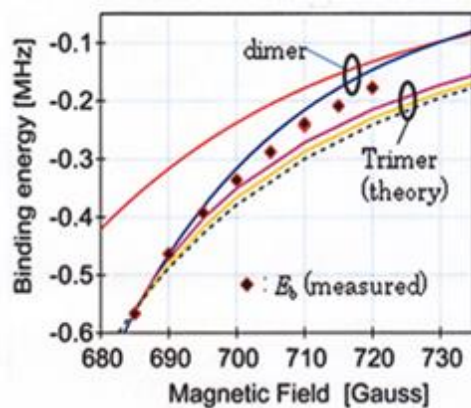


図 1-17 エフィモフ状態の理論曲線と実測の差¹⁰

(5) その他

本プロジェクトの特別重点期間において、中性原子 ${}^6\text{Li}$ のトラップとイオン ${}^{40}\text{Ca}^+$ のトラップを同一空間上に実現し、中性原子とイオンの相互作用を研究する実験系を準備した。

⁹ 本プロジェクト研究終了報告書(p63 5章 図8)

¹⁰ 本プロジェクト研究終了報告書(p63 5章 図9)

第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況

2.1 各研究テーマの終了後の状況に関する基礎データ

2.1.1 調査方法

調査は、文献調査(プロジェクト報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・受賞他)の調査からなる基礎データ調査と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査により行った。これに基づき、プロジェクト期間中の成果の現時点での発展状況、及び波及効果等についてまとめた。

(1) 基礎データ調査の方法

基礎データ調査については、基本的にプロジェクトメンバー全員を対象として、プロジェクトの研究に関連した成果の発展状況について、文献による成果の把握と、論文や研究助成金の獲得状況等のデータ調査を行った。各項目について、利用したデータベースと調査範囲等を下記に記す。

①論文

プロジェクト期間中の論文は、プロジェクトの研究終了報告書に成果論文としてリストアップされている論文とした。成果論文リストの中で in press、submit 等と表記があり、その後発表されたものについても、基本的には期間中の論文とした。

プロジェクト終了後の論文は、2012 年 4 月以降に発表され、かつプロジェクトメンバーが著者になっている論文を収集した(ただし、プロジェクト期間中の論文に含むものは除く)。収集した論文の中で、プロジェクトとの関連を Abstract 等で確認し、関連のあるものを関連論文としてリストアップした。

データベースは、Scopus 及び、Web of Science を利用した。

②競争的研究資金の獲得状況

プロジェクトメンバー全員を対象として、研究内容がプロジェクトの研究内容に関連している研究課題について調べた。

データベースとしては、プロジェクトメンバーの所属する研究室や本人の WEB サイト、及び KAKEN 科学研究費助成事業データベース等の、競争的研究資金に関する検索サイトと、補助的に Google 等の検索サイトも利用した。

③特許の出願・登録状況

プロジェクト期間中の特許は、研究終了報告書の成果リスト記載の特許とした。プロジェクト終了後の特許は、2012 年 4 月以降に出願された特許で、かつプロジェクト関係者が発明者に入っているものから、プロジェクトの成果と関連のある特許を収集した。

データベースは、PatentSquare、補助的に特許電子図書館、Espacenet を利用した。

④招待講演

プロジェクトメンバーの終了後の招待講演実績を、所属する研究室や本人の WEB サイトの調査、Google 等の検索サイト、①で記述した文献データベースの会議録情報、等を併せて収集し、かつ、インタビューの際に主な招待講演について確認した。

(2)インタビュー調査の方法

インタビューは、プロジェクトメンバー(研究総括、グループリーダー)、外部有識者(プロジェクト評価委員等)を対象として行った。プロジェクト関係者には、基礎調査で知り得た情報とプロジェクトとの関連や、その後の展開等に関する情報を聴取した。また、外部有識者からは、部外者の視点で見たプロジェクトの成果、プロジェクトの意義や、当該研究分野における波及効果等の情報を聴取した。

2.1.2 競争的研究資金の獲得状況

本プロジェクト期間中から現在までの、プロジェクトメンバーも含めた競争的研究資金の獲得状況を表 2-1 に示す。

表 2-1 競争的研究資金の獲得状況(2017年1月末時点)

| 競争的研究資金 | 名称 | 予算額 (億円) | 研究 代表者 | 研究年度 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--|--------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| ERATO | 上田マクロ量子制御 | 総額: 16.32 | 上田 正仁 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | CREST(新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製 領域) | 総額:3.11 | 高柳英明 (GL 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 科研費 若手研究(A) | 総額:0.28 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 科研費 特定領域研究 | 総額:0.75 | 福山 寛(研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 科研費 特定領域研究 | 総額:0.44 | 上田 正仁 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 科研費 基盤研究(B) | 総額:0.16 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 科研費 若手研究(A) | 総額:0.22 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 科研費 基盤研究(B) | 総額:0.19 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 科研費 若手研究(A) | 総額:0.28 | 井上 慎 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | 総額:0.12 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 競争的研究資金 | 名称 | 予算額 (億円) | 研究 代表者 | 研究年度 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--|--|-----------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | | | | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | |
| 10 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | 対称性の破れた凝縮系におけるトポジカル量子現象の総括 | 総額:0.74 | 前野 悦輝 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | トポジカル凝縮系の理論 | 総額:0.93 | 田中 由喜夫 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 科研費 基盤研究(B) | 高密度量子色力学と強結合冷却原子気体における量子相転移の統合的解明 | 総額:0.19 | 初田 哲男 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 科研費 基盤研究(B) | 冷却原子気体における自発的対称性の破れの研究 | 総額:0.17 | 上田 正仁 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 最先端研究開発支援 最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT) | ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模2次元量子計算機の実現 | 総額:1.63 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 科研費 若手研究(A) | レーザー冷却イオンで実現する極低温中性原子気体の局所物性研究 | 総額:0.25 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | レーザー冷却イオンと中性原子を用いた極低温分子の実現 | 総額:0.11 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 科研費 基盤研究(B) | 量子縮退した極性分子気体の実現 | 総額:0.19 | 井上 慎 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 科研費 基盤研究(B) | 単一原子分解能をもつ位相差顕微鏡で探る冷却原子マクロ量子系のダイナミクス | 総額:0.10 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | 冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式 | 総額:0.67 | 堀越 宗一 (研究分担者 向山敬) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 科研費 基盤研究(B) | 多成分冷却原子気体の多体効果とフラストレート磁性超流動体の研究 | 総額:0.08 | 上田 正仁 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 科研費 基盤研究(B) | 極低温下での分子生成過程に現れる量子統計効果の研究 | 総額:0.13 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 科研費 基盤研究(B) | 極低温下での分子生成過程に現れる量子統計効果の研究 | 総額:0.13 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | 対称性の破れた凝縮系におけるトポジカル量子現象の総括 | 総額:0.74 | 前野 悦輝 (連携研究者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | トポジカル物質科学国際ネットワークTopo-Qの構築 | 総額:0.82 | 川上 則雄 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | トポジカル相におけるエキゾチック準粒子 | 総額:0.44 | 川上 則雄 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 科研費 新学術領域研究(研究領域提案型) | トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティアの総括 | 総額:0.28 | 川上 則雄 (研究分担者 上田正仁) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | CREST(新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクス)の基盤技術領域 | ポケットサイズレーザー冷却システムの開発 | 総額:3.00 | 上妻 幹旺 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | さきがけ光の極限制御・積極利用と新分野開拓領域 | 極低温イオン・原子混合系で探る極低温化学反応過程 | 総額:0.40 | 向山 敬 | | | | | | | | | | | | | | | | |

上田は競争的資金を 8 件(期間中 3 件、期間後 5 件)獲得しており、各グループリーダーも順調に競争的資金を獲得している(井上: 期間中 2 件、期間後 0 件、上妻: 期間中 6 件、期間後 1 件、向山: 期間中 3 件、期間後 4 件)。特に上妻は「最先端研究開発支援 最先端・次世代研究

開発支援プログラム(NEXT)」の4年間約1.6億円の高額研究資金を獲得し、さらに2016年度からCRESTの研究資金も獲得している。向山は2016年度から「さきがけ」の研究資金を獲得している。さらに、向山と堀越はERATOの成果により、「科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)」において、中性子星に関する研究プロジェクトに加わり、テーマ「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」で研究資金を獲得した。

表 2-2 競争的資金の概要(2017年1月末時点)

| No | 概 要 |
|----|--|
| 1 | 本研究では、高い集積性と、長いコヒーレンス時間という優れた特性を備えた、超伝導磁束量子干渉計(SQUID)を用いて、まず1量子ビットの高速動作の実現とSQUID間の古典的な相互作用の解明、そしてコヒーレンスを阻害する要因の理論的解明を行う。この後、2つのSQUIDの量子もつれ状態の実現を介して、基本的量子ゲートの実現に取り組む。量子計算の基本である量子もつれ状態の解明・実現は、量子コンピュータ実現のための避けては通れない第一歩であり、初歩的な量子コンピュータ実現へとつながることが期待される。 |
| 2 | Rbの冷却原子集団と単一光子との間に軌道角運動量に関するエンタングルメントを生成することに成功した。ハイパーファインポンピングされた原子集団にC数とみなせるような光を照射するとAnti-stokes Raman過程がおこる。この際、ある特定の空間モードに射出された単一の光子を検出すると、原子のディッケ状態を1つ励起することができる。原子系のデコヒーレンス時間内であれば、Stokes Raman過程を誘起するような光を照射することで、好きな時刻に単一光子を取り出すことが可能となる。このようにして発生した単一光子が、実は原子集団との間に軌道角運動量のエンタングルメントをもつことを確かめた。Dislocationをもつホログラムとシングルモードファイバーとの組み合わせを利用して、軌道角運動量に関する量子トモグラフィを行い、再構成された密度行列要素から、エンタングルメントの指標であるEntanglement of formation(EoF)を評価した。その結果、0.6という値を得た(EoF>0の場合、エンタングルメントが存在する)。今回の実験は、軌道角運動量状態を2次元に限定して行ったが、系が本質的に多次元の性質をもっていると推定することはごく自然である。量子情報が原子集団の空間的な位相分布にマッピングされるため、非共鳴のレーザーを絞って原子集団に照射することで、エンタングルメントコンセントレーションを行うことも可能となるだろう。さらに、対応する原子集団を凝縮体にかえることで、イラスト状態の励起など物性面に関する研究を行うことも可能となる。 |
| 3 | 特定領域研究の実施によって得られた研究成果の取りまとめを行った。具体的な研究成果は以下の通りである。 (1)2次元 ³ Heから銅酸化物高温超伝導体までもを包含する、多体フェルミオン系への粒子(キャリア)ドーブがもたらす強相関効果の一般概念が提出された。 (2)強相関フェルミオン系に三角格子など幾何学的フラストレーションが加わると、局在直後にギャップレススピン液体状態という新奇磁性が普遍的に発現することが分かってきた。 (3)制限された空間に閉じ込めたボーズ超流体の研究から、局在BEC状態という新しい量子状態の存在を確立した。 (4)超流動ヘリウムと中性原子気体BECを舞台に、コルモゴロフ則が量子乱流でも成り立つことを示すなど、「量子流体力学」と呼べる新しい学問分野を創出した。 (5)スピン三重項超伝導・超流体の表面や界面に特有な近接効果や表面束縛状態の研究を進め、「奇周波数ペアリング」という新概念の理解を深化させ、マヨラナ準粒子状態を実験的に見出すことに成功した。 以上は、いずれも新しい研究潮流として、物理学、物質科学に大きなインパクトを与えることができた。 |

| No | 概 要 |
|----|---|
| 4 | <p>本研究では、内部自由度(スピン)を持った冷却原子気体のBECの超流動性の研究を行った。スピン自由度を持ったBECは外部磁場によって異なった量子凝縮相をとりうる。このような系において外部磁場を短時間で変化させることにより、スピンの渦が自発的に生じるKibble-Zurek機構を数値シミュレーションで実証した。また、結び目励起や非アーベル渦が内部自由度をもったBECで生じることを見出した。</p> |
| 5 | <p>本研究の目的は、光と冷却原子集団との間に多次元のエンタングルメントを生成し、かつ制御する手法を開発することにある。冷却された原子集団に光を照射し、単一のアンチストークス光子を検出することで、原子集団内に単一の励起を生成することができる。その後、逆過程を誘起すれば、今度は単一のストークス光子を発生させることができる。これらアンチストークス光子とストークス光子の間の軌道角運動量相関を検出することで、原子系とアンチストークス光子との間の多次元エンタングルメントを検証することを目的として、研究を行った。ここで生成されたエンタングルメントは、外部運動状態の量子テレポーテーションへの応用、あるいは量子通信において通信容量を増やす新しい手段として活用が期待できる。平成18年度、レーザー冷却された原子集団とアンチストークス光子との間に2×2次元の軌道角運動量に関するエンタングルメントが生成されていることを確認することに成功した。具体的には量子トモグラフィを行い、再構成された密度行列からEntanglement of formationを評価し、0.76>0という結果を得た。平成20年度は、空間位相変調器を用いることで、軌道角運動量$l=-1, 0, 1$の各種重ね合わせ基底に対する測定を実現し、これにより3×3次元の量子トモグラフィを行った。最尤法によって再構築された密度行列より最大限エンタングルした状態に対するフィデリティを算出し、そこからシュミットナンバーを計算した。シュミットナンバーとは、系が何次元のエンタングルメント状態にあるかを判定するパラメータであり、今回、世界ではじめて3、つまり多次元のエンタングルメントを確認することに成功した。</p> |
| 6 | <p>原子線を生成する領域に当たる原子線源, 原子線を減速するゼーマン減速器, 原子をトラップする領域に当たるメインチャンバを設計, 作成した。ゼーマン減速器に発生させる磁場を作るための10個の並列安定化電流源を作成し, レーザー光の周波数を調節することにより原子線の減速に成功した。さらに対向する6本のレーザーと設計された不均一磁場を用いて減速されたリチウム原子をトラップ領域において捕獲することに成功した。本実験で条件を最適化することにより得られた原子数は3×10^9個で, これはリチウム原子のトラップを行っているグループの原子数と比較しても大きい数である。また, このトラップチャンバは後の実験の都合を考え光学的なアクセスが良いガラスセルで作成した。また, 量子縮退を得る手法である蒸発冷却においてトラップ領域の真空度は重要となる。装置においても後の実験に十分な超高真空($\sim 10^{-11}$Torr)を達成した。</p> |
| 7 | <p>本研究は、中性原子気体のBEC凝縮体を利用して量子猫状態を生成することを目的としている。まず、ダブル磁気光学トラップ用超高真空槽、ならびにクローバーリーフ型磁場トラップを構築し、87Rb原子のBEC凝縮体を生成した。しかし磁場トラップによる磁気シールドの磁化の影響で、$10 \mu\text{G}$以下まで残留磁場を抑圧することが難しかったため、光トラップのみを用いてBEC凝縮体を生成する方式に切り替えることにした。YVO₄結晶を用いて$1.06 \mu\text{m}$、10Wのレーザーを自作し、その出力を、真空ガラスセルをふくむボウタイ型光共振器に導入することで、十分なポテンシャルを有する光トラップを構成することに成功した。この光トラップは、パーマロイ磁気シールドと共存しており、磁気光学トラップを内部で行っても、残留磁界を数μG、残留磁場勾配を$2 \mu\text{G}/\text{cm}$にとどめることが出来る。</p> |
| 8 | <p>光トラップ中で41カリウムと87ルビジウムを同時にBEC凝縮させることに成功した。3次元光格子ポテンシャルを作るために、半導体励起固体レーザー(DPSS)の開発を行い、単一周波数(波長1064nm)で10ワットのcwレーザーの作成に成功した。さらに、波長809nmの光トラップも用いることで、ルビジウムとカリウムの質量差からくる位置のずれを補正することにも成功した。また、フェッシュバハ共鳴を用いて、異種原子間の相互作用を制御することで、ルビジウムとカリウムの2つのBEC凝縮体の相分離と混合の制御が可能なことを示した。</p> |

| No | 概 要 |
|----|---|
| 9 | <p>本研究は、Yb原子がもつ核スピンを利用したクラスター量子計算を実現することを目的としている。具体的には、ソリッドイメージンレンズの近傍に2次元光ポテンシャルを形成し、量子ビットとなる冷却されたYb原子を規則正しく配列する。ソリッドイメージンレンズを真空ガラスセル内に固定した形で、10-11Torr台の超高真空状態を実現することに成功した。次に、Ybの磁気光学トラップを行い、冷却された原子集団を532nmのレーザーを用いてトラップした。レーザーのウェストポイントを、空気式移動台を用いて移動させることにより、磁気光学トラップを作成する真空チャンバーから、先程説明したガラスセルチャンバーへと原子を移動させた。移動距離は400mmである。ガラスセル中に固定されたソリッドイメージンレンズの直下まで運ばれたYb原子集団の光トラップ寿命を測定したところ、84秒を得ることが出来た。この値は、174YbによるBEC凝縮、および171Ybのフェルミ縮退を、蒸発冷却を用いて実現する上で十分な真空度といえる。また単一のYb原子を用いた実験を別途行い、微小共振器と1.5μm帯のレーザーを用いたシュタルクシフトを利用することで、核スピン情報を実時間で読み取る新しい技術を確立することにも成功した。</p> |
| 10 | <p>本領域が創り出した言葉でもある「トポロジカル量子現象」は、引き続き世界的に大きな研究展開の潮流を生み続けており、本領域はもちろんその一翼を担って新しい学術領域を創り出す動きに精力的に取り組んでいる。集中連携研究会や領域研究会・領域国際会議での研究発表や討論からも、本領域ならではの分野横断的アプローチで相乗効果的な研究成果をうむ動きが実を結んでいる。トポロジカル絶縁体の実証は既に達成できたといえ、トポロジカル超伝導と超流動との共通認識ならでの研究進展もあり、冷却原子も含む様々な物質系でのトポロジカル量子渦などの研究も大いに深化した。</p> <p>さらに、当初計画では予想されていなかった成果として、結晶構造に鏡像反転対称性がある場合のトポロジカル普遍量が明確になり、トポロジカル絶縁体の開発やトポロジカル超伝導の性質解明に応用されるようになった。</p> |
| 11 | <p>スピン軌道相互作用により従来型s波超伝導体からカイラルエッジ状態が作れることがすでに佐藤の理論で知られていたが[M. Sato et al., Phys. Rev. Lett., 103, 020401 (2009)]同様の機構から半導体2次元電子ガスを強磁性体と従来型s波超伝導接合系でサンドイッチした系でもカイラルエッジ状態が存在することが理論的に示せる。田仲らは、この系のエッジ状態および常伝導金属との接合のトンネル効果を研究し、エッジ状態形成における量子臨界を理論的に解明した。その結果、エッジ状態が強磁性体の交換磁場および2次元電子ガスの化学ポテンシャルにより制御可能であることが明らかになった。近年、52Crなどの大きい角運動量を持った原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現している。これら内部自由度が大きい系では、相互作用パラメータに依存して様々な磁性を示す相が出現するため、エネルギーを最小化する方法で基底状態を求めるのは容易ではない。そこで上田らは、対称性をもとに、スピン自由度を持ったBECの基底状態を求める方法を開拓した。この方法をスピン3のBECに適用し、先行研究では見落とされていた相を発見した。制限空間中の超流動$^3\text{He-A}$はスピン自由度を持ったカイラルp波超流動体である。水島らは、この系における半整数量子渦状態の熱力学的安定性についてギンツブルグ・ランダウ理論により調べた。特に、スピン揺らぎフィードバック効果による強結合効果とフェルミ液体補正の効果が半整数量子渦の安定性に与える影響を明らかにした。また、低エネルギー準粒子状態についてBogoliubov-de Gennes方程式の数値解析により調べ、そのマヨラナ性について議論した。また、非可換ゲージ場中でのボース凝縮体に自発的に現れる様々なスピントクスチャー構造について統一的に理解した。</p> |
| 12 | <p>中性子内部の高密度状態ではクォーク物質への転移や中間子凝縮相の可能性が考えられる。本研究では、ハドロン物理の研究者と原子分子物理の研究者が連携し、高密度QCDにおける諸相の統合的理解を目指し、(1)対称性に基づくQCD諸相の分類、(2)強結合クォーク物質と中性子星の構造、(3)多バリオン系に対する格子QCD計算、(4)冷却原子気体の量子ダイナミクス、についての理論的研究を進めた。その結果、高密度におけるハドロン相とクォーク相のクロスオーバー現象が中性子星質量にもたらす影響や、高密度物質における中間子凝縮相を双極型相互作用を持つ冷却原子/分子気体で再現できる可能性を明らかにした。</p> |

| No | 概 要 |
|----|--|
| 13 | <p>本研究は冷却原子気体における自発的対称性の破れに注目して研究を行った。具体的には、スピン自由度を持ったスピノールBEC、スピン-軌道相互作用をする系、および、人工ゲージ場下で高速に回転するボーズ気体の系に関する研究を行った。特筆すべき成果としては、最初の系に対しては、ボゴリウボフ理論を超えるベリアエフ理論の構築に成功し、スピン2BECの相転移の基本的性質を説明した。2番目の系に対しては、スピン-軌道相互作用に起因するさまざまな種類の量子渦および渦格子を見出した。最後の系に関しては、ボソンの量子ホール効果の予言を行った。</p> |
| 14 | <p>レーザーで冷却されたYb原子を、光の干渉によって作られた2次元周期ポテンシャルにトラップし、原子を量子ビットとして起用することで、大規模な量子計算を行うことを目的として研究を行った。2次元周期ポテンシャル中に冷却された原子をトラップすることが出来ても、各サイトにトラップされた個々の原子を弁別して顕微鏡観察することが出来なくては、上記の量子計算は実行できない。そのため本プロジェクトでは、光学顕微鏡の分解能を向上させる力をもつ固浸レンズの直下にて、100nK程度の温度をもつ原子集団を100nm程度の薄いシート状にし、それらを2次元周期ポテンシャル中にトラップし、個々のサイトを分解して観察する顕微鏡を開発することを目指した。量子ビットのコヒーレンス時間は、迷走磁場によってスピンのフリップすることにより制限される。レーザー冷却が容易なアルカリ原子は、基底状態に電子性のスピンをもち、磁気モーメントが大きいため、本研究目的には不向きである。磁気モーメントが電子のその2000分の1しかない核スピンに着目し、基底状態に核スピンのみをもつ特殊な原子種であるYbに対して、上記の顕微鏡を構築することにした。4年間の研究を通し、Yb原子を100nm程度の薄いシート状に加工する技術を開発するとともに、固浸レンズ系を利用することで、2次元周期ポテンシャル中に閉じ込められた個々の原子を、各サイトを分解する形で画像化することに世界で初めて成功した。今後、量子計算、新規材料探索を進める上で、圧倒的な力をもつ装置を開発することが出来たといつてよい。</p> |
| 15 | <p>本研究ではレーザーによって極低温にまで冷却されたイオンと中性原子を用いて極低温イオン-原子混合系を実現した。極低温のイオンと中性原子を生成するために必要な各種レーザー光源を作成し、イオンと中性原子を同一の真空チャンバー中において捕獲、冷却した。捕獲された中性原子を光ピンセットの手法でイオントラップの位置に輸送し、両者を混合させ低温領域における弾性散乱断面積の測定に成功した。</p> |
| 16 | <p>本研究ではこれまで全く別の実験系として扱われてきたイオントラップと中性原子のトラップを同一空間中に実現し、その両者の相互作用を利用して極低温の分子イオンの生成を目指す。本研究では原子間相互作用がフェッシュバハ共鳴を利用して可変な中性原子6Liを、またこの原子種との混合系を作成した際のトラップの安定性・熱平衡への到達し易さなどを考慮してLi原子よりも数倍質量の思い$^{40}\text{Ca}^+$をイオン種として選定した。実験ではトラップされたイオンからの蛍光をPMT検出器で観測するとともにCCDカメラで空間的な分布も測定した。精密な調整の結果、トラップしたイオンが10分程度監視していてもロスしない程度の長寿命を実現することができた。また、イオンの数を減らしてRF電場による加熱の影響を小さくしていくことで、イオンの結晶化の観測にも成功した。結晶化が見えたことからレーザーによってイオンが効率よく冷却されていることが分かる。イオントラップについての実験準備が整いつつある中で、イオントラップと中性原子トラップの混合系を生成するためのチャンバーの作成を開始した。イオンと中性原子を混ぜる方法はいろいろな手法が考えられるが、量子縮退した中性原子と振動基底状態に落ちたイオンの混合系が最終目標であり、その目的に最も相性の良いと考えられる光ピンセットを用いた方法を採用した。この方法イオントラップと中性原子のトラップを別々の位置に作成し、光ピンセットの手法を用いて中性原子気体をイオントラップの位置に運ぶ方法である。今回イオンと原子を同一空間に作成するチャンバーを作成し、イオントラップチャンバー側ではイオンが、中性原子チャンバー側では中性原子がそれぞれトラップされている状況をすでに実現することに成功した。</p> |

| No | 概 要 |
|----|--|
| 17 | <p>量子縮退した極性分子気体の実現は量子エレクトロニクス分野の悲願のひとつである。最近では米国コロラド大学(JILA)のグループがボース・フェルミ混合気体を量子縮退「近く」まで冷却した後、フェッシュバハ共鳴と誘導ラマン断熱遷移(STIRAP)を用いて振動回転基底状態に移す事で極低温の極性分子の作成に成功している。しかし彼らの実験においては量子統計の異なる原子気体を用いているために、量子縮退領域では2つの原子気体の空間的重なりが悪くなり分子の生成効率が著しく下がってしまうという問題が報告されている。これに対し、本研究では2種類のボーズ気体から出発しているために原子気体を量子縮退の状態に準備してから分子作成に進んでも分子生成の効率が高いことが期待される。しかし現実にはその鍵を握るのはフェッシュバハ共鳴における非弾性散乱係数の大きさであり、本実験で用いる41カリウムと87ルビジウムの組み合わせにおいてこの値が大きいと、実験のプランそのものを再考せざるをえなくなる。昨年度は新しいイメージング法(シュテルン・ゲルラッハ撮影法)を導入し、生成された分子が少数でも精度良く検出する方法を確立した。しかし検出された分子数は千個程度と依然として少なく、原子との衝突により壊されるレートが大きいことが予想された。今年度は光格子の中で分子を生成することで、分子の長寿命化に取り組んだ。原子との衝突が完全に無視できるようにするには、光格子に使うレーザー光のスポットサイズを小さくしてポテンシャルの山を十分に高くする必要はある。しかし集光しすぎるとビームの強度の空間的不均一性が大きくなり、モット絶縁体において2個以上同種粒子が入っているサイトの数が増えて分子の生成効率が下がってしまう。最適なビーム径を目指して実験が行った</p> |
| 18 | 未公開 |
| 19 | <p>中性子星inner crust領域の低密度中性子物質の状態方程式(EOS)を決定する為、s波相互作用している極低温フェルミ原子気体の実現に成功し、フェルミ超流動状態が実現されていることを確認した。またEOS決定へ向け高分解能撮像システムのノイズレベルを大幅に減少させることに成功し、高精度にトラップ中のフェルミ原子気体の密度分布を評価できるようになった。原子数の定量的な評価も重要であり、撮像条件やCCDカメラの仕様を取り入れた高精度な原子数評価が行えるようになった。CCDカメラで得られる原子の密度分布はグローブ光方向に積分された情報だが、逆アーベル変換を用いる事により、元の三次元イメージを再構築できる準備が整った。さらに相互作用しているフェルミ粒子系の温度を測定する為、温度計として用いる原子の導入も行った。核子密度が高い領域に於いては、s波相互作用のみならず、p波相互作用も重要になってくる。冷却原子系を用いてp波超流動を実現するためにはp波フェッシュバハ近傍における原子間相互作用パラメータの詳細を知る必要がある。特定の方向のトラップ周波数に共鳴するような周波数で光トラップ強度を変調することで、1軸方向だけ原子の運動エネルギーを増大させ、その運動エネルギーが他の軸方向に移る時間を測定した。運動エネルギーが他の軸に移るのは原子間の散乱が起源であるために、このエネルギーが変換される時間によって弾性散乱断面積が測定できる。この測定によりこれまで不明であった相互作用パラメータを決定することができた。中性子物質や非対称核物質の状態方程式に実験・観測から制限を与える可能性について理論的な研究も実施した。特に、低エネルギーの電気双極子(E1)共鳴状態のE1強度分布と状態方程式との関係を精密に調査し、安定線から遠く離れた原子核のデータから強い拘束を与える可能性を示唆した。</p> |
| 20 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 質量がゼロの粒子が量子揺らぎで有限の質量を持つことがあるが、量子揺らぎの効果は非常に小さく、観測は困難であった。スピノルBECではqNGボソンの出現エネルギーギャップが系のゼロ点エネルギーの百倍にもなり、実験的観測がかのうであることを示した。さらに、このモードの伝播速度は量子揺らぎで減少することがわかった。この仕事はPhysical Review Letters 誌に出版された。 2. 同種ボソン系において、粒子間相互作用の強さを大きくすると、無限個の離散スケール不変な3粒子束縛状態(Efimov状態)が現れる。Efimov状態は、くりこみ群のリミットサイクルによってその普遍性が特徴づけられるという点で、ユニークな系である。冷却原子系において、Efimov状態の3体パラメータ普遍性と呼ばれる新たな普遍性クラスの存在が実験的に発見された。この普遍性クラスと、リミットサイクルとの関係を明らかにした。この仕事は、Physical Review Letters 誌に出版された。 3. 人工ゲージ場下の冷却原子系の示す量子スピン・ホール物理における相互作用効果を研究できる例として、二成分ボース気体に反平行な人工磁場を印加した時間反転対称な系を解析し、分数量子スピン・ホール状態が成分間斥力相互作用の非常に強い領域まで安定に現れること、成分間相互作用が引力の場合には二成分の粒子がペアを組んだ厳密な基底状態が得られることを示した。この仕事はPhysical Review A 誌に出版された。 |

| No | 概 要 |
|----|--|
| 21 | <p>平成27年度はそれまでに観測に成功していた原子イオン間の電荷交換衝突過程について、衝突エネルギー依存性の詳細な検証を行った。それまではイオンの持つ運動エネルギーとして1ミリケルビンという条件下での電荷交換衝突のみの観測を行っていたが、平成27年度にはイオン原子間の衝突エネルギーを1ミリケルビンから10ケルビンという4桁にわたる衝突エネルギーの領域において電荷交換衝突断面積の測定を行うことができた。衝突エネルギーの制御を行う際にはトラップ中のイオンに一樣電場を印加し、イオンの位置を精密に制御することでRF電場による加熱現象を誘起させるという手法を用いた。その際にイオンの運動エネルギーが蛍光スペクトルの変化をもたらし、スペクトル形状から高い精度で運動エネルギーを決定するという手法を開発することで、4桁という広いエネルギー領域にわたる測定を可能にした。この測定により上記のエネルギー領域で電荷交換衝突が古典的な衝突理論で予言できるエネルギー依存性を示していること、さらに原子イオン間の距離が非常に近い距離まで近づく衝突をした際にどのくらいの割合で電荷交換衝突と弾性衝突が起こるかという比率を実験的に決定することに成功した。今回測定した電荷交換衝突断面積の情報は用いているカルシウムイオンとリチウム原子間の相互作用ポテンシャルを決定する際の基礎データとなるものであり、本研究の最終目的である極低温での化学反応過程の観測のターゲットである分子イオン生成を実現するためにも重要な基礎データを与える観測結果である。</p> |
| 22 | <p>平成27年度には非弾性散乱過程をミリケルビンの温度領域で観測することに成功し、さらにイオンの温度をさらに冷却するために必要なサイドバンド冷却法のための狭線幅の729nmのレーザー光源系の作成を行った。今後はこのレーザーのさらなる狭線幅化と長期安定度の確保、さらにこのレーザーを用いたイオンの分光と実際のイオンの極低温化が目標である。長期安定度確保のための共振器の温度安定化の改善を行い、狭線幅レーザーの周波数安定度を高めることを行う。これらが実現できればイオンを10マイクロケルビン以下の極低温にすることが可能になり、現在すでに観測に成功している弾性散乱と電荷交換散乱について10マイクロケルビンの温度領域における観測ができるようになる。用いているカルシウムイオンとリチウム中性原子においてはこの温度領域は散乱過程が量子的になる温度領域であり、この温度領域での安定した原子イオン混合系は世界中でまだ実現されておらず、この系が非常に有力な候補となっているだけに10マイクロケルビンの実現はインパクトが大きい。さらにこの温度領域の実現は極低温化学反応過程の観測についての重要なステップでもある。</p> |
| 23 | <p>第一に、本研究領域は世界をリードする多くの研究成果を生み出し、当該学問分野における我が国の国際的優位性の確保と、その向上に大きく貢献した。また、積極的にアウトリーチ活動が実施されたことは、物性物理学における新しい概念の普及という点で高く評価できる。本研究領域の活動によって、多くの若手研究者が育成されたと認められた。また、新学術プロジェクトならではの、異なる専門分野研究者間の連携による研究成果・論文成果、5回開催(そのうち2回は国際会議として開催)した領域研究会の成果、17回開催した「集中連携研究会」の成果、若手育成のための若手国際会議や若手相互滞在プログラムの成果、市民講座や出前講義の成果の分析も行った。第二に、本領域の研究活動から生み出されたトポロジカル量子現象に関する新学術領域をさらに発展させるための活動を行った。まず、引き続き領域のHPと事務局を維持し、研究成果情報の収集と公開に務めるとともに、トポロジカル量子現象の研究に関わる研究者に対しての情報ソース・フォーラムとしての機能も果たし続けた。幸い、後継新学術領域プロジェクト「トポロジーが紡ぐトポロジカル物質科学のフロンティア」が採択されたので、さらに飛躍的な発展を生むために必要な引き継ぎ活動を行った。</p> |

| No | 概 要 |
|----|---|
| 24 | <p>(1) Topo-Qネットワーク組織の構築 [1-1] Topo-Qネットワーク立ち上げ・運営のための派遣・招聘：12月にサンディエゴで開催された米国ムーア財団EPiQSプログラム主催の国際ワークショップで、分担者の前野が本領域研究及びTopo-Qを紹介する講演を行った。また3月にボルティモアで開催されたアメリカ物理学会(APS)に分担者の藤澤をはじめコアメンバーを4名派遣し、海外関係者とTopo-Qネットワーク会合を開いた。アライアンス・ワークショップに関して、平成28年度9月にドイツで開催予定のマックスプランク研究所との研究会、および12月にムーレア島で開催予定のEPiQSとの研究会の運営組織を立ち上げて日程を決定し、プログラムの議論を始めた。[1-2]連携インフラの国際機能強化 [川上(代表者)、前野・藤澤・佐藤宇・高木(分担者)]：国際的なTV会議に対応できるシステムを導入し、他のメンバーにもユーザーライセンスを付与できる体制を整えた。</p> <p>(2) JREP(若手研究者派遣・招聘プログラム)の実施 [上田・佐藤宇(分担者)]：申請・審査に基づき、助教の海外派遣(米国)を1件実施した。</p> <p>(3) REP(研究者派遣・招聘プログラム)の実施 [田中・佐藤宇(分担者)]：申請・審査に基づき、准教授の海外派遣(米国)を1件、海外から研究者招聘を4件実施した。そのうちBednorz博士(1987年度ノーベル物理学賞受賞者、スイス)には、京都大学で開催した主に高校生向けの公開講座にも参加してもらった。</p> <p>(4) Topo-Q PDの公募と採用 [藤澤(分担者)、川上(代表者)]：領域内公募・審査委員会での審査に基づき、国際性を重視した外国人(インド)PD雇用を行った。</p> |
| 25 | <p>トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子に研究において、以下の成果を得た。トポロジカルモット絶縁体において、トポロジーと電子相関の絡み合いによる「温度に誘起されたトポロジカルエッジ状態」の出現を理論的に提案した。時間反転対称性を破り周期的に変調されたハニカム光格子中のボース・アインシュタイン凝縮体が、トポロジカルな性質によりカイラルエッジ準粒子を生むことを明らかにし、相互作用の増加に伴いトポロジカルに非自明な領域が広がることを見出した。ディラック半金属やトポロジカル結晶絶縁体などにキャリアをドープした時に現れる超伝導状態の研究を行った。特に、ディラック半金属の超伝導状態がトポロジカル結晶超伝導体になりうること、その表面に4組のマヨラナ励起が生じることを示した。超伝導体・超流動体におけるトポロジカル構造と対称性の関係性について、超流動³Heを中心に調べた。³Heの持つ高い対称性がマヨラナイジングスピンやワイルフェルミオンなどの豊富なトポロジカル量子現象をもたらすことを明らかにした。量子ドット系におけるコンダクタンスの測定と等価な測定を、冷却原子気体におけるスピンの自由度を用いて行えることを示した。特に近藤効果の観測に用いることができることを示し、トポロジカル近藤格子系の性質の解明へと繋がりを示した。磁場下のトリプレットの中性子超流動をGL理論で解析することで、整数渦の解を構成しその性質を調べた。カラー超伝導において、非アーベリアン渦のコアに局在する、Majoranaフェルミオンモードと南部Goldstoneモードの相互作用を決定した。対称性に守られたトポロジカル相を基底状態に持つクラスターモデルを拡張し、基底状態相図と非平衡ダイナミクスを調べた。その相図に複数のトポロジカル相が現れることを示し、二つのトポロジカル相をまたぐスイープダイナミクスの非断熱性を明らかにした。</p> |
| 26 | <p>研究領域「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」を推進するための領域運営の総括班として、領域研究者間の連携強化に重点をおいて活動した。その他、若手研究者の育成、アウトリーチ活動、領域webの作成等を行っている。「総括班会議」：領域研究会と日本物理学会(春、秋)の会期中に総括班会議を開催し、運営方針や研究計画について協議した。「領域研究会」：キックオフ研究会として領域研究会(京都)を開催し、本新学術領域の目指す目標についてメンバー全員の共通意識を高めた。「トポロジー連携研究会」：研究項目内の連携を強化する研究会を4回、計画研究間の連携を強化するための焦点を絞った共通テーマとして「ワイル・ディラック半金属」(東北大学)と「人工量子系」(東京大学)を開催した。「若手励起プログラム」：若手研究者の育成を行うため、領域内外の研究室に若手を相互に派遣し、集中的な議論を通して若手の意識・力量を“励起”した。「アライアンス・ワークショップ」：本領域独自の取り組みである「アライアンス・ワークショップ」(H28年度)の開催に向けて準備を行った。28年度は9月にドイツ・マックスプランク研究所、12月にタヒチでEPiQS(アメリカのプロジェクト)と共同開催の準備を行った。「WEB広報」：領域ウェブサイトを開設し、領域の目的・内容や研究成果のページを充実させた。「ニュースレター」：領域の計画・成果、研究動向などについて、ニュースレターを冊子体で発行した。「アウトリーチ」：高校への出張授業やノーベル物理学賞のベドノルツ博士を招いて「高校生向けの講演会」を開催した。「国内アドバイザー(評価班)」：領域研究会に参加していただき、領域運営や研究推進に関する助言を頂いた。</p> |

| No | 概 要 |
|----|---|
| 27 | 原子、ナノ粒子に対するポケットサイズのレーザー冷却システムを構築する。原子のレーザー冷却システムに搭載する絶対重力計は、海洋資源探索のため無人深海探査艇に搭載されている既存のスプリング型相対重力計に比べ、1桁以上高い精度を提供する。ナノ粒子のレーザー冷却システムは、地震予知、火山活動探査において中心的な役割を果たしている既存の傾斜計に比べ、2桁高い感度を提供する。 |
| 28 | 本研究では、精密に制御されたレーザーによる冷却技術を駆使することで原子気体系とイオン系において極低温の状態を実現し、原子とイオンを混合させた際に起こる極低温化学反応過程を詳細に調べる。この研究により、化学反応過程に反応粒子の量子統計性がどのように影響を与えるかという原子分子物理学と量子化学の分野にまたがる難問に挑戦し、両者を融合した研究領域を創ることを目指す。 |

2.1.3 論文の発表状況

(1) プロジェクト期間中の成果論文

本プロジェクト期間中の発表論文と被引用件数の推移を、図 2-1 に示す。

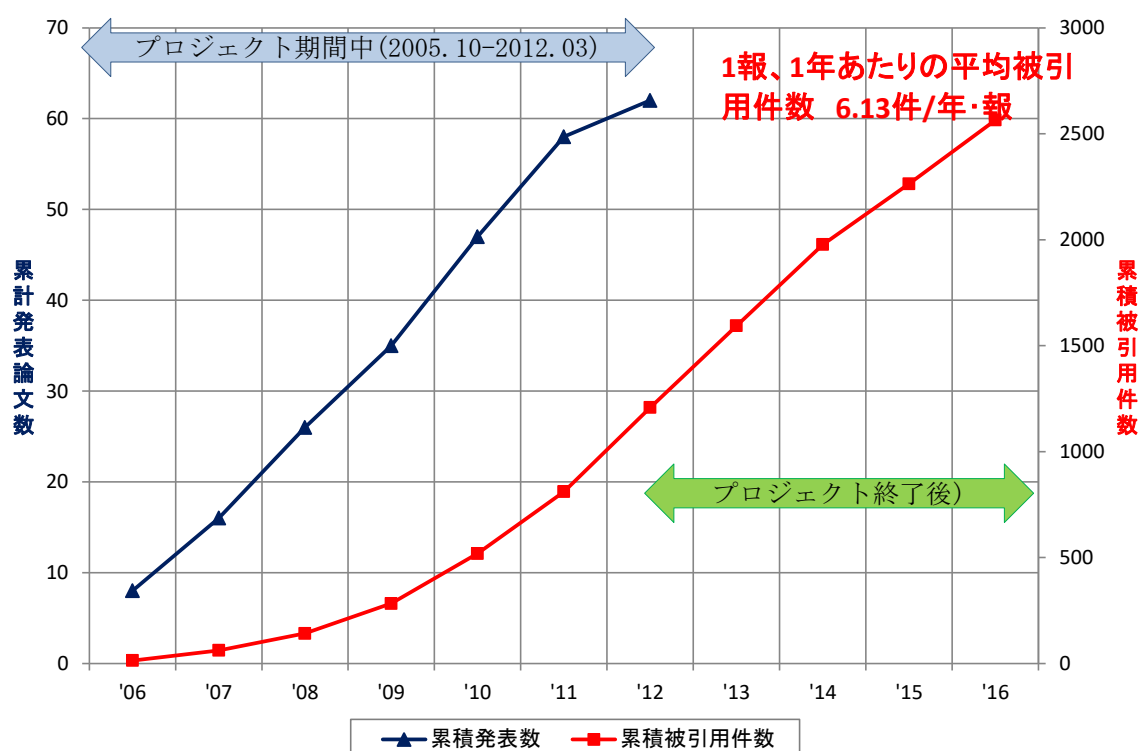


図 2-1 プロジェクト期間中の成果論文の発表数と被引用件数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2017/2/8)

期間中の発表論文数は上田が 48 件、実験グループの井上が 5 件、上妻が 4 件、向山が 5 件であった。プロジェクト開始と共に実験装置を立ち上げ、また実験結果の取得に時間を要したことも有り、実験グループの最初の論文発表は、プロジェクト開始から 3 年後の 2008 年であった。

図 2-2 は、被引用件数上位 5 件の論文の推移を示したものであるが、このうちの 4 件の論文(図中の 1, 2, 3, 5)は上田研究室が主体の理論研究である。4 位は ERATO 実験グループ、井上の「光

会合による冷却分子生成」の論文であり、向山の「ユニタリー極限における普遍的な熱力学的関数の決定」の論文はわずかの差で6位であった。この2件の論文が、8～9年経過後の現在も、毎年確実に引用数が増えていることは、その先進性と重要性を示している。これら上位5件の論文の概要を表2-3に記載する。

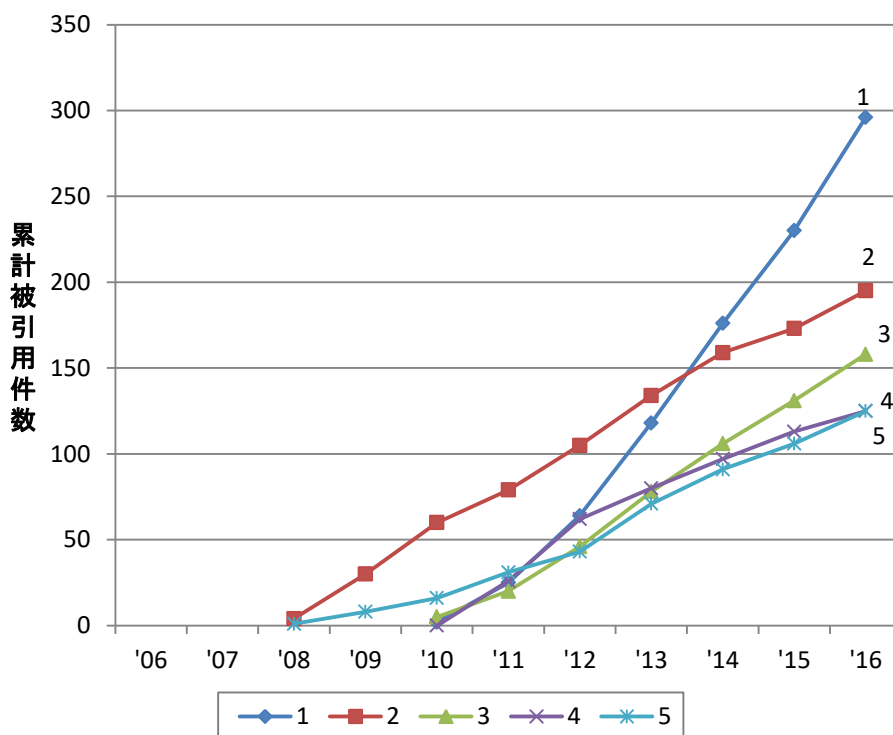


図 2-2 プロジェクト期間中の成果論文のうち、被引用件数が上位5件の被引用件数の推移 (検索 DB:Scopus 検索日 2017/2/8)

表 2-3 プロジェクト期間中の被引用件数上位5件の論文概要

| No | タイトル | 著者 | 掲載誌 | 巻 | 号 | ページ | 発行年 | IF | 被引用件数 |
|----|--|--|----------------|---|----|---------|------|-------|-------|
| 1 | Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality | Toyabe, S., Sagawa, T., Ueda, M., Muneyuki, E., Sano, M. | Nature Physics | 6 | 12 | 988-992 | 2010 | 18.79 | 296 |
| | <p>概要：1929年にレオ・シラードは、マクスウェルのデーモンと呼ばれる仮想的な知性一が熱を等温環境からポンプで汲んで、それを仕事に変えるフィードバックプロトコルを発明した。長期にわたって激しい論争の後、デーモンの役割が熱力学の第2の法則を否定するものではないことがようやくはっきりした。それは、原理的に、情報をフリーエネルギーに変えることができることを意味した。しかし、この情報のエネルギーへの転換の実験的な実証は困難であった。ここでは、その位置に関する情報を基礎としたブラウン運動する粒子の非平衡フィードバック操作がエネルギーへのシラードタイプの情報転換を成し遂げることを証明する。リアルタイムのフィードバック制御を使って、電界によって作られた螺旋階段のようなポテンシャルを粒子に登らせて、粒子はその上でなされる仕事量より大きな自由エネルギーを得る。この事によって一般的なJarzynskiの等式を確かめることができ、フィードバック制御によって情報をエネルギーに変える『熱への情報エンジン』の新しい基本的な原理を提案する。</p> | | | | | | | | |

| No | タイトル | 著者 | 掲載誌 | 巻 | 号 | ページ | 発行年 | IF | 被引用件数 |
|----|--|---|-------------------------|-----|----|--------|------|-------|-------|
| 2 | D-Wave collapse and explosion of a dipolar bose-einstein condensate | Lahaye, T., Metz, J., Fröhlich, B., Koch, T., Meister, M., Griesmaier, A., Pfau, T., Saito, H., Kawaguchi, Y., Ueda, M. | Physical Review Letters | 101 | 8 | 80401 | 2008 | 7.645 | 195 |
| | <p>概要：衝突相互作用を特徴づけているs-波散乱長が臨界値以下で減少するときの、⁵²Cr原子のダイボース凝縮体の崩壊のダイナミクスの研究である。異方性すなわち凝縮体のd波対称性爆発を含む、複雑なダイナミクスが観察された。原子数は、崩壊の間、急速に減少する。実験結果と3次元Gross-Pitaevskii方程式（衝突と2極相互作用ならびに3-体損失を含む）の数値のシミュレーションが良く一致することを見出した。崩壊が反対方向に回転する2つの渦リングを含んでいることを、シミュレーションは示している。</p> | | | | | | | | |
| 3 | Generalized Jarzynski equality under nonequilibrium feedback control | Sagawa, T., Ueda, M. | Physical Review Letters | 104 | 9 | 90602 | 2010 | 7.645 | 158 |
| | <p>概要：非平衡システムがフィードバック制御を受ける状況に対して、Jarzynski等式は一般化されている。フィードバックの結果として起こる新しい言葉は、フィードバック制御の測定と有効性によって得られる相互の情報内容を記述する。この結果は、読みだす情報を反映する一般化した変動-消散定理につながり、そして、小さな熱力学系を使って実験的にテストすることができる。一般的な結果を「情報ラチェット」を導入することで例示する。そして、それは1つの方向にブラウン運動粒子を輸送することができて、正味の仕事を粒子から抽出することができる。</p> | | | | | | | | |
| 4 | Coherent transfer of photoassociated molecules into the rovibrational ground state | Aikawa, K., Akamatsu, D., Hayashi, M., Oasa, K., Kobayashi, J., Naidon, P., Kishimoto, T., Ueda, M., Inouye, S. | Physical Review Letters | 105 | 20 | 203001 | 2010 | 7.645 | 125 |
| | <p>概要：光会合とそれに続く誘導ラマンの断熱的な過程によって、レーザー冷却した41Kと87Rbから超低温41K87Rbの分子回転振動基底状態への直接転移に成功したことを報告する。高分解能の分光によって、コヒーレント転移の基礎となる束縛領域に弱く結合した分子の超微細構造を明らかにした。レーザー冷却した原子の光会合を通して、回転振動がない超低温基底状態分子試料が得られた。その結果、多種多様な分子をコヒーレントに操るという可能性が開けた。</p> | | | | | | | | |
| 5 | Second law of thermodynamics with discrete quantum feedback control | Sagawa, T; Ueda, M | Physical Review Letters | 100 | 8 | 80403 | 2008 | 7.645 | 125 |
| | <p>概要：離散的量子フィードバック制御の助けを借りて複数の熱浴から抽出できる最大の仕事を導く新しい熱力学的不等式が導かれる。最大仕事量は、自由エネルギー差と、熱力学系とフィードバックコントローラとの間の一般的な相互情報量によって決定される。この最大仕事量は従来の熱力学のそれを超えることができ、2つの熱浴を用いた熱サイクルの場合、熱効率はカルノーサイクルよりも大きくなり得る。この結果と熱力学の第2の法則との無矛盾性は、フィードバックコントローラの情報処理のために作業が必要であるという事実によって保証される。</p> | | | | | | | | |

(2) プロジェクト終了以降の発表論文

プロジェクト終了後の論文について、累積発表論文数と累積被引用件数の推移を図 2-3 に示した。

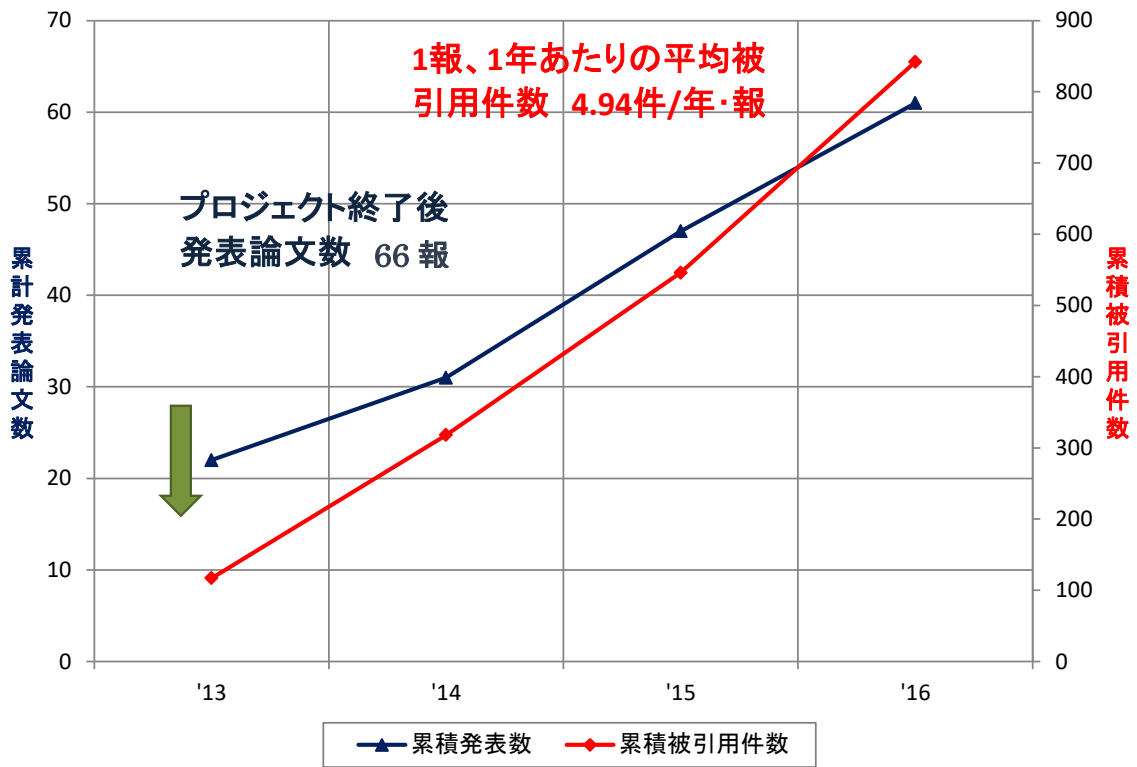


図 2-3 プロジェクト終了以降の発表論文と被引用件数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2017/2/8)

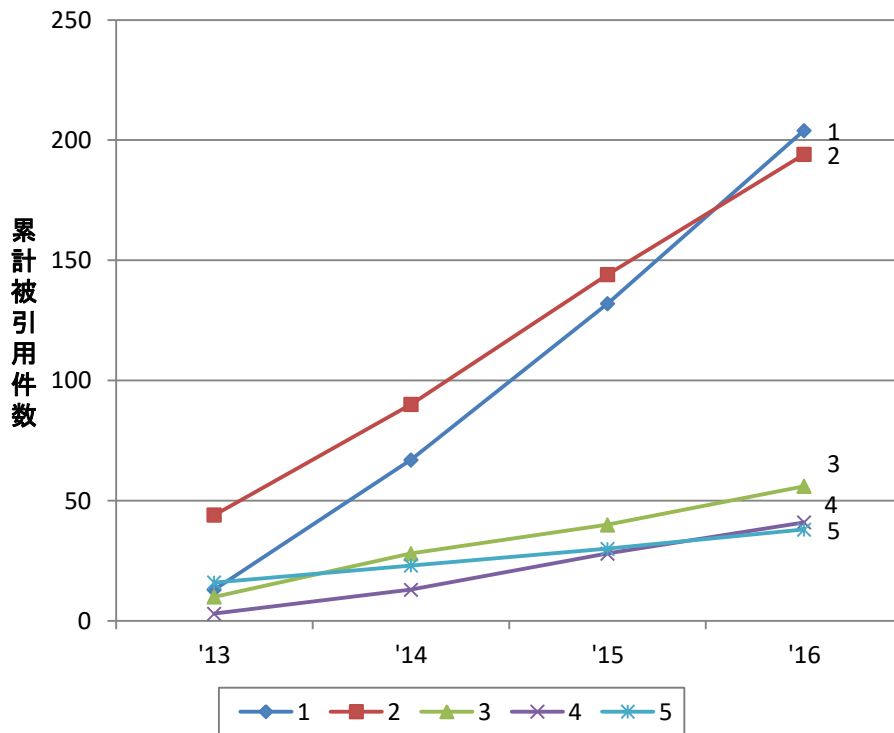


図 2-4 プロジェクト終了以降の成果論文の内、被引用件数が上位 5 件の被引用件数の推移
(検索 DB:Scopus 検索日 2017/2/8)

上記調査データでは、上田の発表論文と、プロジェクト後独立した各グループリーダーの発表論文の合計は66件であった(2017年2月調査時点)。内訳は、上田が52件(期間中48件)、井上が3件(期間中5件)、上妻が4件(期間中4件)、向山が7件(期間中5件)であり、プロジェクト終了後の論文発表数は2012年9件、2013年13件、2014年9件、2015年16件、2016年14件である。プロジェクト終了以降の論文のうち、被引用件数が上位5件の論文概要と、被引用件数の推移をそれぞれ、表2-4と図2-4に示す。被引用件数の1位は総説であり、上位2件の被引用件数の増加が顕著である。

表 2-4 プロジェクト終了後の被引用件数上位5件の論文概要

| No | タイトル | 著者 | 掲載誌 | 巻 | 号 | ページ | 発行年 | IF | 被引用件数 |
|----|--|------------------------------|---------------------------|-----|----|-----------|------|--------|-------|
| 1 | Spinor Bose gases: Symmetries, magnetism, and quantum dynamics | Stamper-Kurn, D.M., Ueda, M. | Reviews of Modern Physics | 85 | 3 | 1191-1244 | 2013 | 33.177 | 204 |
| | <p>概要：原子ガスによるボーズ-アインシュタイン凝縮の達成が最近の超流動体への道を開いた。その中にはスピン自由度が流体の時間発展で、および/またはその平衡状態で決定的な役割を演ずる。本稿は、スピノル・ボーズ気体の領域における最近の理論的、実験的な進歩をレビューする。特に、新しいテクスチャーやトポロジカルな欠陥の出現について記述し、磁気秩序とボーズ-アインシュタイン凝縮の間の関係性を議論する。</p> | | | | | | | | |
| 2 | Spinor Bose-Einstein condensates | Kawaguchia, Y., Ueda, M. | Physics Reports | 520 | 5 | 253-381 | 2012 | 16.24 | 194 |
| | <p>概要：スピノールと2極性ボーズ-アインシュタイン凝集物(BECs)の物理のレビューである。スピノールBECsの平均場基底状態、ボゴリューボフスペクトル、多体の基底状態と励起状態を議論する。スピン分極化された2極性BECsとスピノール-2極性BECsの特性をレビューする。分数渦と非アーベル渦のようなスピノールBECsの渦の独特の特徴のいくつかを詳細に記述する。秩序パラメータの対称性は群論を使って分類され、いろいろなトポロジカルな励起はホモトピー理論に基づいて研究されている。スピノールBECの最近の進展が議論される。</p> | | | | | | | | |
| 3 | Fluctuation theorem with information exchange: Role of correlations in stochastic thermodynamics | Sagawa, T., Ueda, M. | Physical Review Letters | 109 | 18 | 180602 | 2012 | 7.645 | 56 |
| | <p>概要：非平衡システムとその他の自由度(例えばオブザーバーとフィードバック・コントローラ)の間での情報交換の存在下における変動定理を確立する。そこでは、情報交換の量はエントロピー量に付加される。結果として生じる一般的な第2法則が、情報交換におけるエネルギー散逸とエネルギーコストの基本的な限界を決めている。この結果はフィードバック制御されたプロセスだけでなく情報交換の非常に幅広いクラスにもあてはまって、測定とフィードバック制御の非平衡熱力学の統一的な枠組みを提供する。</p> | | | | | | | | |

| No | タイトル | 著者 | 掲載誌 | 巻 | 号 | ページ | 発行年 | IF | 被引用件数 |
|----|---|---|-------------------|----|---|-------|------|-------|-------|
| 4 | Atomic spin-orbit coupling synthesized with magnetic-field-gradient pulses | Xu, Z.-F., You, L., Ueda, M. | Physical Review A | 87 | 6 | 63634 | 2013 | 2.765 | 41 |
| | <p>概要：RashbaまたはDresselhausタイプのような磁場勾配パルスを使って、原子のスピン-軌道結合(SOC)を生成することの一般的なスキームを議論する。原子内部の状態をdressed状態部分空間に制限して、断熱的な質量中心運動をベースにした伝統的なスキームと対照的に、原子磁気モーメントと外部の磁場の間の結合を利用することによって、超微細スピン多様体の完全な部分空間でこのスキームは働く。空間依存性のパルス磁場は内部状態依存性のインパルスとして働き、それによってアインシュタイン-ド・ハース効果のように原子内部のスピンとその軌道の質量中心運動を結合する。この効果的結合を、ダイナミックに操作することにより、どんなタイプの(Rashba, Dresselhausまたはそのどんな一次結合でも)SOCでも合成することができる。このスキームは超低温原子の大部分の実験的なセットアップで実現でき、特に核スピンゼロの原子に適している。</p> | | | | | | | | |
| 5 | Symmetry classification of spin-orbit-coupled spinor Bose-Einstein condensates | Xu, Z. F., Kawaguchi, Y., You, L., Ueda, M. | Physical Review A | 86 | 3 | 33628 | 2012 | 2.765 | 38 |
| | <p>概要：擬スピン-1/2、スピン-1とスピン-2におけるスピン-軌道結合したスピノル・ボーズ-アインシュタイン凝縮体の基底状態を見出すためと、スピンと空間の同時SO(2)対称性が分離した循環グループへと壊れるとき、格子ポテンシャルがない中で様々な格子構造が出現することを示すために、対称性分類のスキームを開発している。擬スピン-1/2凝縮物とネマティック渦格子の二つの異なるカゴメ格子の例を含んでいる。一軸性と二軸性のスピン構造がスピン-2の凝縮体が交互に整列する。擬スピン-1/2システムについては、平均場状態が常に時間反転対称を壊すが、時間反転不変の多体基底状態が存在し、それは断片的で、マイクロ凝縮体状態で観察される</p> | | | | | | | | |

2.1.4 特許の出願・登録状況

特許の出願・登録はない。

2.1.5 招待講演

国際会議での招待講演の研究者別(筆頭研究者)の回数を表 2-5 にまとめた。

表 2-5 研究者別の国際会議の招待講演の回数(2017年2月22日時点)

| | 全体 | 期間中 | 期間後 | 備考 |
|--------|----|-----|-----|-------------------------|
| 上田 | 98 | 57 | 41 | 研究総括 |
| 井上 | 19 | 14 | 5 | グループリーダー |
| 上妻 | 2 | 2 | 不明 | グループリーダー ⁽¹⁾ |
| 向山 | 20 | 10 | 10 | グループリーダー |
| 堀越 | 5 | 5 | 0 | 博士研究員 |
| 小林 | 2 | 2 | 0 | 博士研究員 |
| Naidon | 9 | 9 | 0 | 博士研究員 |
| Zhang | 1 | 1 | 0 | 博士研究員 |

※(1)情報提供を頂けなかったため、期間中の件数は基礎データのみのものであり、期間後は不明とした。

本プロジェクト終了後の上田の国際会議の招待講演回数は 41 件、井上は 5 件、向山は 10 件であった。

2.2 各研究テーマの進展状況

本プロジェクト終了後、3つの研究テーマはそれぞれの拠点に実験設備を移設、再調整し、それぞれの研究方針のもと、研究が継続されている。

2.2.1 相互作用制御の研究

相互作用制御グループは、本プロジェクトで得た $^{41}\text{K}^{87}\text{Rb}$ の基底状態の分子を使って、分光学的な精密測定を展開した。分子の基底状態が実現したため、レーザー光によって任意の励起状態へと遷移させて、任意の分子振動モードや、分子回転運動が、精密に測定できるようになった。この特性を利用して、陽子・電子質量比の精密測定を行い、世界最高の測定精度を達成した。また、冷却原子の3体共鳴（エフィモフ状態）の研究において、エフィモフ状態の同位体シフトの同定と、その理論的解明に成功した。以下に、これら2件の研究成果について概要を述べる。

(1) 陽子・電子質量比の精密測定¹¹において世界最高精度を達成

陽子・電子質量比は、アインシュタインの等価原理によれば不変であるとされている。しかし、宇宙的な時間の中で不変であるかどうかは不明であり、超精密測定により不変性を確認できる。具体的には、光会合により K と Rb が弱く結合した分子を生成し、STIRAP により基底状態にし (1.5.1(1)(2))、その極低温の $^{41}\text{K}^{87}\text{Rb}$ 分子に対して分光実験を行うことで、陽子・電子質量比の恒常性検証に適したエネルギー準位を実験的に求めた。実験では、以下の4項目を満足させるエネルギー準位を選択した。

- (i) 陽子・電子質量比に感度が高いこと
- (ii) 外場による影響が小さいこと
- (iii) 測定に用いる周波数の安定度はそれほど高いものを必要としないこと
- (iv) 測定に用いる遷移強度が十分に大きいこと

これらの条件を満足するエネルギー準位を選択した結果、その遷移周波数 f は 635MHz であっ

た。これを統計誤差 $\Delta f/f=2.3 \times 10^{-10}$ で測定した(図 2-5)。これは陽子・電子質量比 (μ) に対して $\Delta \mu / \mu = 1.6 \times 10^{-14}$ の精度に相当する。従来の最高精度の測定は、 SF_6 分子の分子ビームを使う測定法で、 $\Delta \mu / \mu = 4.2 \times 10^{-14}$ の精度であった¹²。したがって、本研究により、2.6 倍程度の精度向上が達成できた。

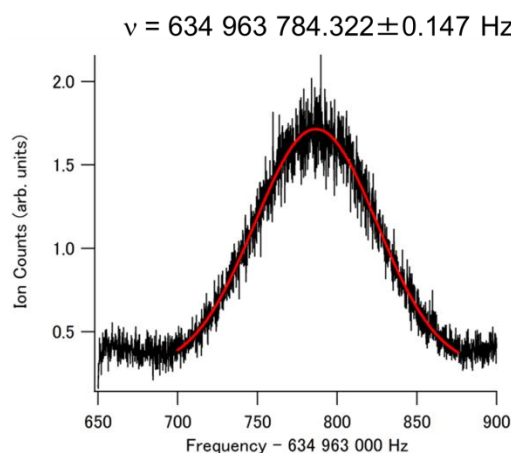


図 2-5 遷移ピーク波形¹¹

(2) エフィモフ状態の同位体シフトの同定と、その理論的解明に成功^[13]

エフィモフ状態の理論によると、3体パラメータと呼ばれるパラメータで特徴付けられること

¹¹ 科学研究費助成事業研究成果報告書 若手研究(A) 課題番号 23684034

¹² Shelkownikov A et al, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 100, 150801, 2008

が知られている¹³。近年、等核原子の系（3 粒子の質量が等しい系）において、様々な原子種・内部状態に対して 3 体パラメータの測定がなされ、その結果、3 体パラメータがファンデルワールス相互作用のみによって決定されることが見出されている。本研究では、異核原子である ^{41}K と ^{87}Rb を用いた系（3 粒子の質量が異なる系）と、 ^{40}K と ^{87}Rb による先行研究¹⁴の結果とを比較し、スピンの効果を入れた 3 体のスピノルモデルによって説明した。

図 2-6 は、Rb 原子と KRb 分子の衝突損失の係数を測定した結果である。衝突損失の係数 β は、損失の大きさ (C_β)、共鳴幅 (η^*)、共鳴が生じる散乱長¹⁵ (a^*) から理論的に計算できる。同位体原子による先行研究の結果との大きな違いは、損失係数 β の大きさと共鳴が生じる散乱長 a^* であった。損失係数 β の大きさは、損失の大きさ C_β の違いから生じており、原子ガスの密度測定からくる系統的な誤差と考えられ、重要ではない。

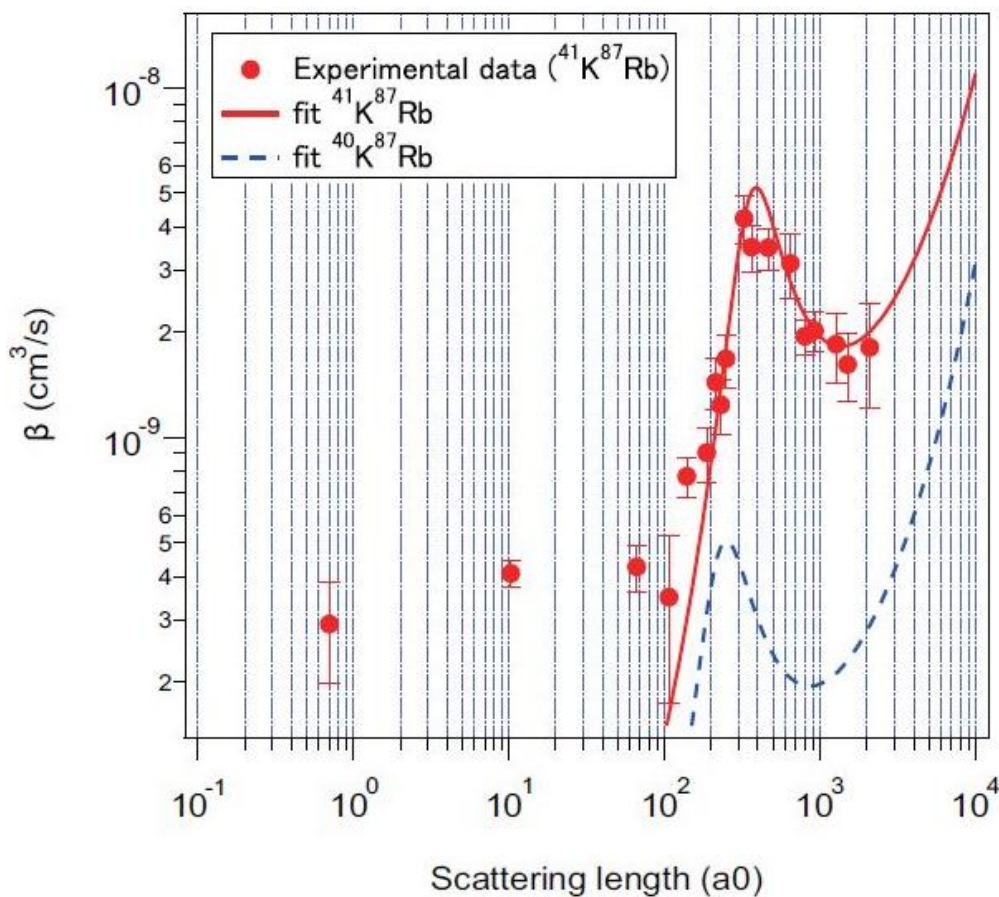


図 2-6 散乱長に対する原子と 2 原子分子 (Rb-KRb) の衝突損失¹⁶。ピークがフェッシュバハ共鳴を示す。赤の実線は ^{41}K と ^{87}Rb による測定データにあてはめた理論曲線。青の点線は同位体 ^{40}K と ^{87}Rb による測定データ（脚注 14 の論文）にあてはめた理論曲線。

¹³ 上田 正仁、応用物理、82 巻、第 9 号、p744-p753 (2013)

¹⁴ Ruth Bloom, Ming-Guang Hu, Tyler Cumby, and Deborah Jin. “Tests of Universal Three-Body Physics in an Ultracold Bose-Fermi Mixture.” *Phys. Rev. Lett.*, 111, p. 105301, (2013).

¹⁵ 低エネルギーの散乱は散乱長という 2 体の相互作用を示す物理量によって特徴づけられる。ここで外部磁場による散乱長の変化をボーア半径 a_0 を単位として示している。

¹⁶ http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp/inouyeLAB/publications/20150220_Kato_Doctor_Thesis.pdf (加藤の学位論文より)

共鳴が生じる散乱長 a^* が、同位体によって異なることを解決するモデルとして、スピノルモデルを提案した。このモデルでは、Rb はスピンの自由度を持たず、K がスピンの自由度を持つとし、このスピノルモデルでシュレディンガー方程式を解くことにより、理論的な損失係数を求めた。その結果を図 2-7 に示す。この図から、フェッシュバッハ共鳴が起こる散乱長は、実測データと理論値がよく一致していることが分かり、スピノルモデルで、同位体原子によるフェッシュバッハ共鳴が生じる散乱長の違いを説明することができた。

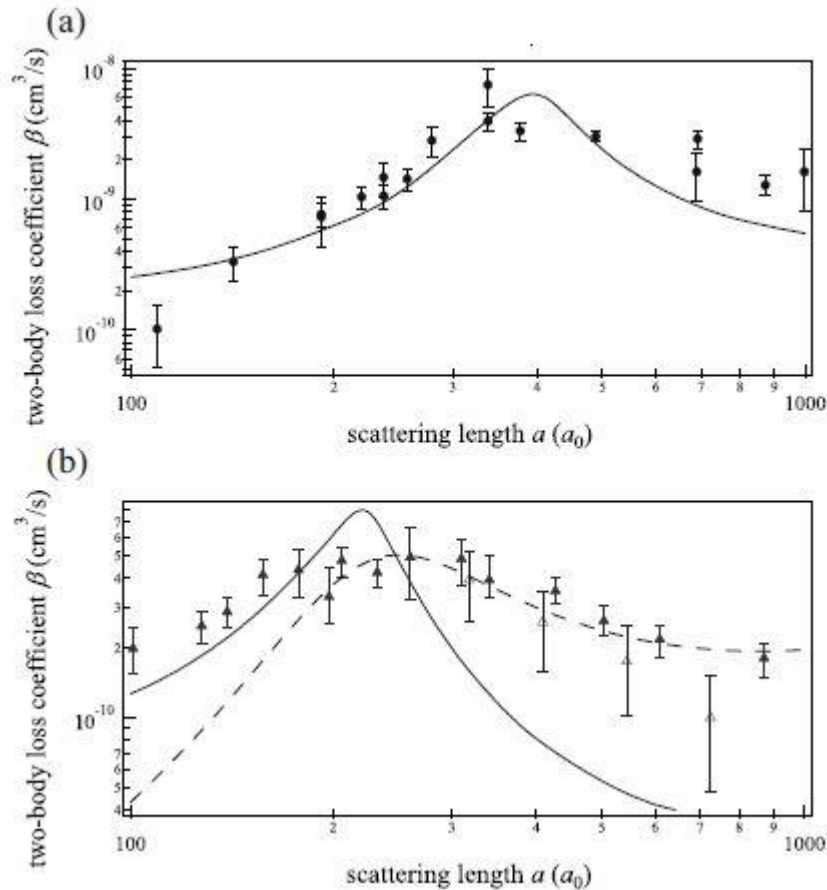


図 2-7 スピノルモデルによる理論曲線と実測値の比較^[13]。実線が理論曲線。(a)は $\text{Rb}+^{41}\text{KRb}$ の場合。(b)は同位体原子による $\text{Rb}+^{40}\text{KRb}$ の場合 (先行研究のデータ)。

2.2.2 不確定性制御の研究

本グループは、量子コンピュータより高温超伝導の量子シミュレーションの方が、より実現性が高く、有用であるとの考えから、量子シミュレーション実現に向け、 ^{171}Yb 単一原子の研究から、複数の ^{174}Yb 原子(ボゾン原子)を2次元に並べ、顕微鏡下で観察、操作する方向へと研究を展開した。以下に、冷却原子群を顕微鏡下に移送する技術開発と、2次元トラップ中の冷却原子の観察についての研究成果の概要を述べる。

(1) 冷却した ^{174}Yb 原子群を顕微鏡下に移送し、観察する技術の開発に成功

冷却した原子を移送し、原子群を顕微鏡下で観察・操作する技術を開発した^[14]。図 2-8 に冷

却原子を移送し、顕微鏡観察する装置の概要を示す。オーブンで作製された ^{174}Yb 原子気体は、399nm の冷却レーザーでゆっくり MOT 中に導かれ、トラップされる。その後、水平レーザー光を集光し、焦点に作られた光ダイポールトラップ中に、原子をトラップする(水平 ODT)。集光レンズをエアベアリングで機械的に動かすことによって、トラップした原子を、ソリッドイマーションレンズ(SIL)のもとへ移送する。図 2-8 の左下の図は、真空中に設置された SIL である。SIL のもとに移送された原子群は、図 2-9 に示す手順(a)-(d)によって、SIL の中央にセットされる(光ピンセット操作)。さらに、浅い入射角のレーザービーム(アコーディオンビーム)によって、SIL の表面に定在波を発生させ、深さ方向に圧縮し、2次元の冷却原子群に変形させる(図 2-10)。入射角度を浅くすると(図 2-10 では 0.75°), 深いポテンシャルが形成され、その中に冷却原子をトラップすることができる。その後、入射角度を連続的に大きくしていくと(図 2-10 では 6.2° の状況)、トラップした冷却原子を圧縮することができ、BEC を実現した。

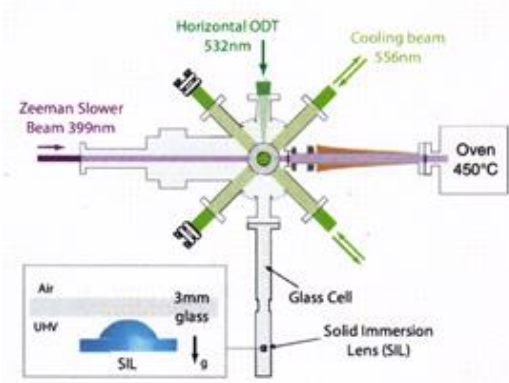


図 2-8 冷却原子を移送し、顕微鏡観察する装置模式図^[14]

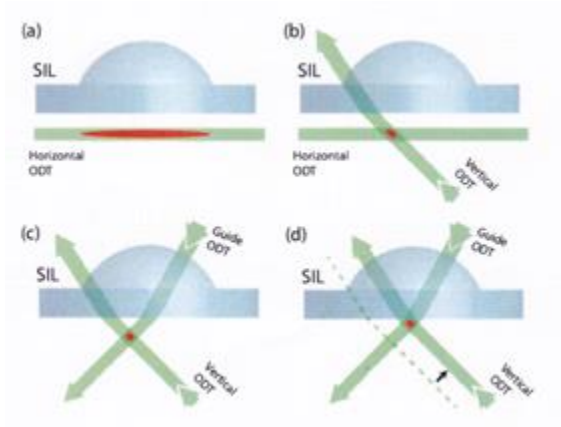


図 2-9 レーザー光によるトラップした原子の移動操作(光ピンセット)^[14]

- (a)Horizontal ODT にトラップされ、SIL の下へ移送された冷却原子。Vertical ODT によって点状に圧縮。
- (b)Guide ODT によって圧縮された原子をトラップし、Horizontal ODT を消す。
- (c)Vertical ODT を移動し、トラップした原子を SIL 表面へ移送する

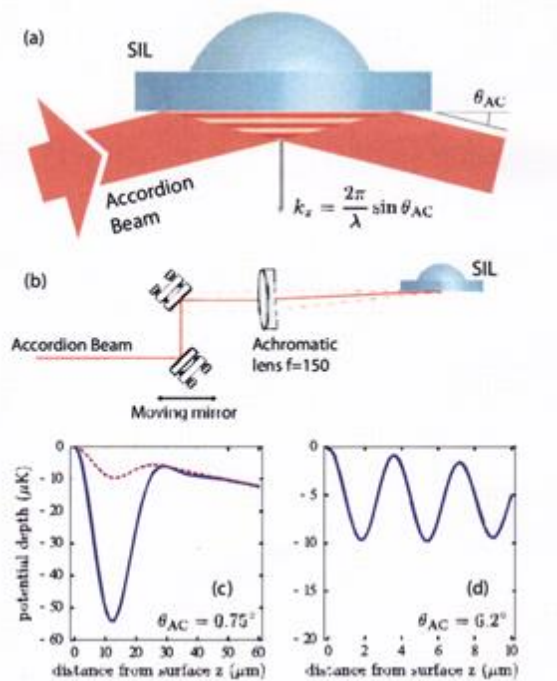


図 2-10 アコーディオン光ビームによるトラップ原子の圧縮^[14]

(2) 2次元光格子にトラップした冷却 ^{174}Yb 原子の観察^[15]に成功

前項のアコーディオン光ビームを2組用意し、直角に配置することで、SILの直下に2次元の光格子を形成する。前項で開発した技術によって、冷却 ^{174}Yb 原子をSILのもとへ移送し、直交するアコーディオン光ビームによって2次元に配置し、圧縮・冷却した(図2-11)。この図で、アコーディオン光ビームと同じ光路から励起光(excitation beam)を入射させ、 ^{174}Yb 原子からの蛍光をCCDカメラで撮像する。

露出時間 $100\ \mu\text{s}$ で得られた画像を図2-12(a)に示す。30点についての画像の平均から、分解能 $310\text{nm}-318\text{nm}$ を得た。従来のアルカリ原子による報告より、露出時間が $1/10000$ 、フォトンの合計数が10倍、という優れた結果を得た。ノイズ除去した画像が図2-12(b)で、80フォトンを閾値として、原子が存在するサイトに黒丸、存在しないサイトに白丸を表示したのが図2-12(c)である。各サイトからのフォトンカウントのヒストグラムを、図2-12(d)に示す。この結果、原子が存在しないサイトは99%以上の確率で正しい。原子が存在するサイトは、原子のトラップからのロスの影響が大きいことが分かった。

BECの原子気体群を顕微鏡下に移送し、2次元光格子中にトラップするとともに、各サイト中の個々の原子を観察することに成功した。今後、トラップされた原子をさらに冷却し、 1nK 程度を実現し、超流動を実現することを目指している。

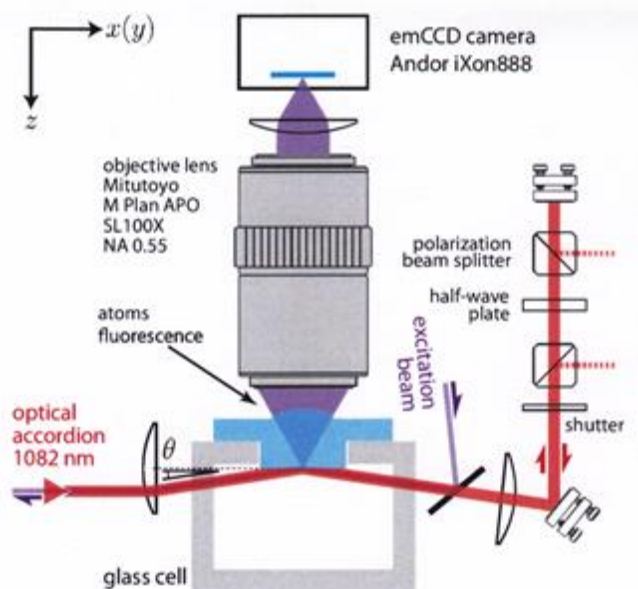


図2-11 2次元光格子にトラップした冷却原子顕微鏡観察装置^[15]

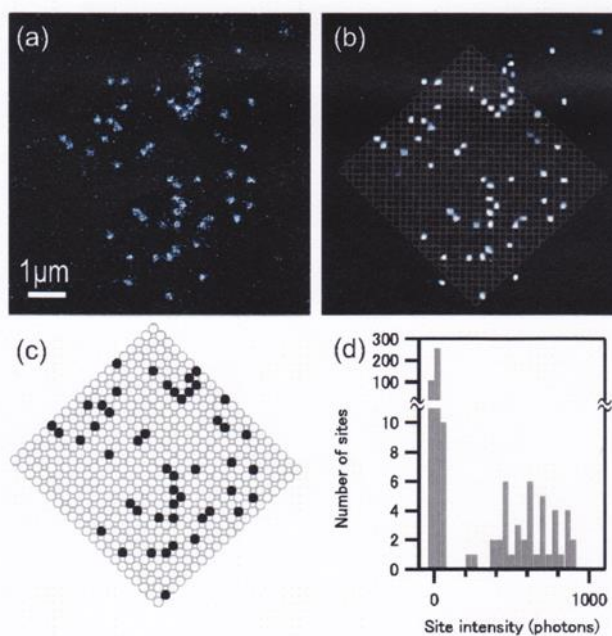


図2-12 2次元トラップされた原子の顕微鏡観察^[15]

2.2.3 強相関量子制御の研究

このグループでは、「p波分子の研究」と、「ユニタリ極限状態の研究」が継続されており、さらに「中性原子とイオンの混合冷却原子の研究」を新たに開始した。「BCS-BEC クロスオーバ

一」と、「エフィモフ状態」の研究は継続していない。以下の(1)では p 波分子の研究成果について、(2)では中性原子とイオンの混合系の研究成果について、それぞれ概要を述べる。

(1) p 波分子の研究

①⁶Li の p 波分子における散乱因子の決定^[16]

⁶Li の p 波フェルミ原子の相互作用には、相互作用を強くすると原子が減ってしまう性質、すなわち原子のロスがある (s 波相互作用にはない性質)。本プロジェクト期間中に p 波分子を生成することができたが、ロスの抑制がうまくいかず、超流動には至らなかった。そのため、より基本的な関係、すなわち磁場で制御する p 波相互作用について、磁場の強さとフェッシュバッハ共鳴における相互作用の強さの関係、ロスの関係を、定量的に明らかにすべく、研究内容をシフトした。その結果、相互作用については、p 波のフェッシュバッハ共鳴の磁場依存性を調べ、散乱因子を決定することができた^[16]。基底状態 $|1\rangle$ の原子について、 $|1\rangle \rightarrow |1\rangle$ のフェッシュバッハ共鳴が起こる磁場に設定し、1 方向のトラップレーザーの強度を、倍の周波数で変調して (1 方向への励起)、動径の 1 方向に余分の運動エネルギーを短時間付与し、非等方的な運動量分布を作る。そのとき、吸収画像は円形から歪む (図 2-13 (b))。その後、保持時間 T_{hold} を経ると、吸収画像は円形へと変化する (図 2-13 (c))。この結果から、直交する 2 方向の運動エネルギーが熱平衡に達する時間 (熱平衡レート) を計算した。磁場が変化したときの熱平衡レートをプロットすると、図 2-14 になる。この図から、熱平衡レートは共鳴磁場 B_{res} (横軸: $B - B_{\text{res}} = 0.0$) 以上で 3 桁増加し、温度が高いほうが (緑のデータ)、熱平衡レートが大きくなる磁場範囲が広いことがわかった。この曲線を理論にあてはめることによって (図 2-14 の実線)、弾性散乱断面積等の、散乱のパラメータを求めることができた。これらの測定は、p 波超流動実現の基礎となる成果である。

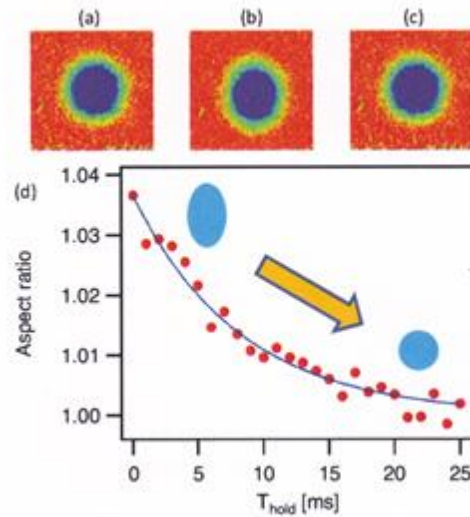


図 2-13 非等方的な運動量からの回復時間による熱平衡レートの測定方法^[16]

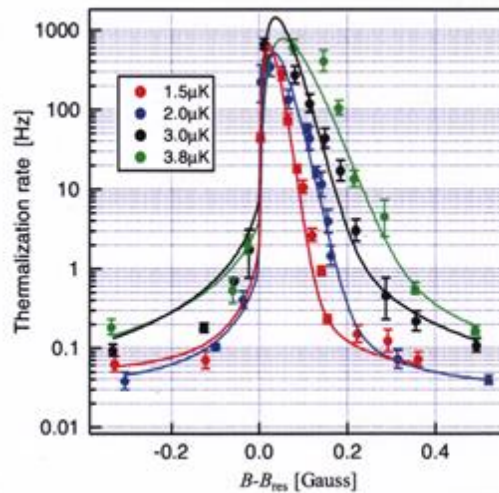


図 2-14 フェッシュバッハ共鳴磁場前後の熱平衡レート^[16]

②p 波分子における選択的な軌道運動量状態の生成^[17]

p 波のフェッシュバッハ分子におけるフェッシュバッハ共鳴には、ダイポール・ダイポール相互作用によって、軌道角運動量 m_l として $m_l=0$ と $m_l=\pm 1$ が存在する。このフェッシュバッハ共鳴の分裂の大きさは、超流動相に大きな影響を及ぼし、大きな分裂は相図が単純になり、小さな分裂は、相図が磁場異方性による変化を示すために、複雑になることが知られている。⁶Li 原子は、従来研究された ⁴⁰K 原子より分裂幅が小さく、多彩な相が存在することは、p 波の超流動を研究するためには魅力的である。しかし、分裂幅が小さいために、それぞれの共鳴を特定し、独立して使うことが難しかったが、本研究では、光格子を使って、 $m_l=\pm 1$ 状態を生成することに成功した。

図 2-15 は、本研究の実験系である。⁶Li 原子は、MOT により図の中央にトラップされる。リトロフレクタを使って、z 軸の上下方向から 1064nm のレーザーを照射し、532nm 間隔に並んだ原子平面の 1 次元格子を用意する。この時、原子は z 方向に強く束縛されているので、x あるいは y 方向の運動量のみ制限され、この方向の衝突が多く起こる。原子は、 $m_l=\pm 1$ の対称性を持った p 波衝突のみをとおして衝突する。

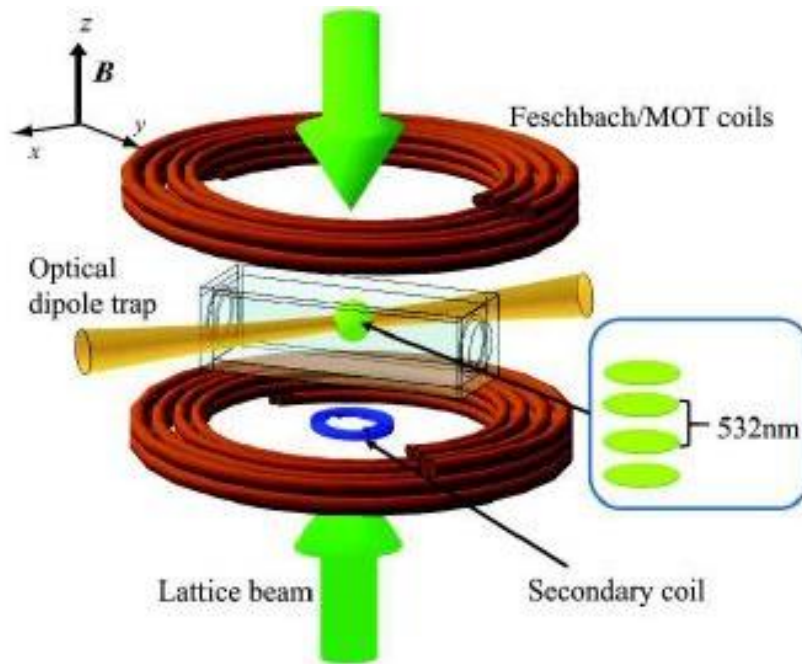


図 2-15 p 波フェッシュバッハ分子の実験系^[17]

このことを確かめるために、p 波分子が解離した原子の運動量分布を測定した。解離した時の運動量分布を測定するために、光格子をオフにして、閉じ込めていた分子を開放する。直ちにフェッシュバッハ共鳴を起こす磁場を、 $50 \mu s$ 以内で通過するように急激に大きくし、分子を解離させる。その後、 $1.1 \sim 1.3 ms$ 後の xy 平面での広がりを観測した結果を、図 2-16 (a) (b) は、光格子のポテンシャルの深さを、それぞれ $3.8 E_{rec}$ ^[17]、 $5.5 E_{rec}$ にした時の解離原子の吸収画像である。これらは、明らかに中央付近で吸収が小さくなったドーナツ状の画像であり、

¹⁷ E_{rec} とは ⁶Li 原子の反跳エネルギーである。 $E_{rec} = \hbar^2 k^2 / (2m) \approx k_B \times 1.4 \mu K$

$m_l = \pm 1$ 状態の、選択的な生成が行われていることを示している。(c)は光格子がない時の吸収画像であり、中央付近の吸収が存在する。

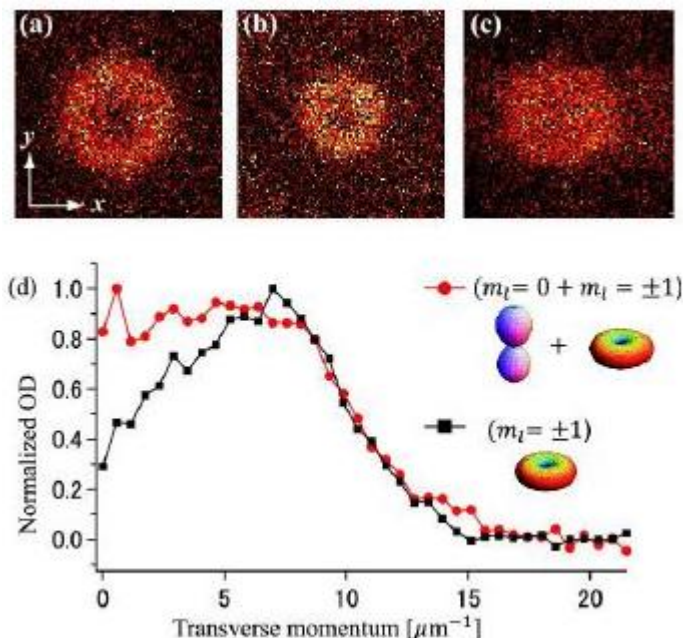


図 2-16 光格子トラップから解放後の解離した原子の吸収画像^[17]。(a)は光格子のポテンシャル深さが $3.8E_{\text{rec}}$ の吸収画像、(b)は同 $5.5E_{\text{rec}}$ の場合 (c)は光格子トラップがない場合。(d)は軸方向に吸収を数値化した図。 $m_l = \pm 1$ では運動量ゼロ、すなわち中央で吸収が減っている。

(2) 中性原子とイオン混合冷却原子系においてイオンから原子への電荷移動の観測に成功

宇宙空間等で起こる冷却原子と冷却イオンの相互作用は、極低温での化学反応の基礎となっており、その解明のために、実験室の冷却中性原子と、イオン系での相互作用を研究した。同じ真空中の MOT 中に ${}^6\text{Li}$ 原子をトラップし、RF 電場中に ${}^{40}\text{Ca}$ イオンをトラップした。冷却後、中性原子を移送し、イオントラップ中で混合した(図 2-17)。冷却原子よりイオンの運動エネルギーが大きく、原子のトラップ障壁が低い状況では、原子とイオンの弾性衝突により、イオンの運動エネルギーが原子に移り、トラップから原子が外れて原子の数が減少する。すなわち、原子の数の変化を、イオンの有無によって測定した(図 2-18)^[18]。その結果、イオンがない状態に比べてイオンがある状態では、原子の数の減少率が大きく、この差が、原子とイオンの弾性衝突を示している。この測定を理論に当てはめ、弾性衝突の衝突断面積を求めた。

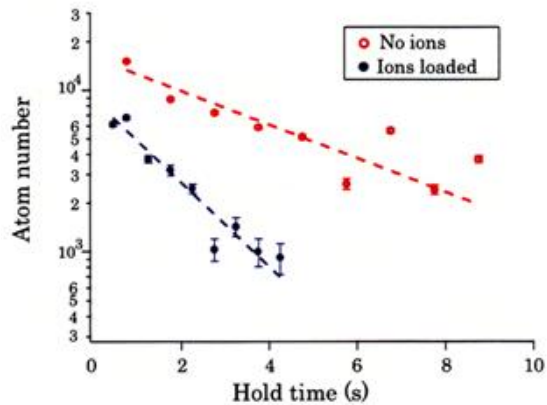
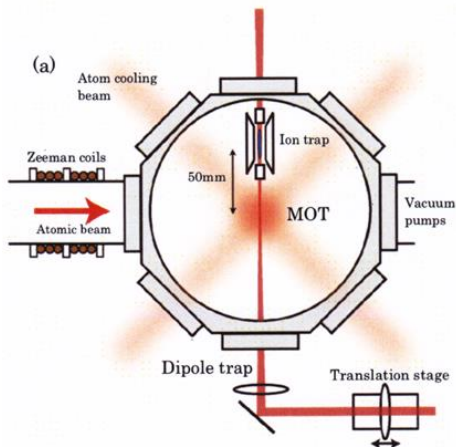


図 2-17 中性原子とイオンの同時冷却実験装置の模式図^[18] 図 2-18 中性原子の有無によるイオン原子のトラップからの減少^[18]

さらに、原子とイオンの電荷の交換による非弾性衝突を研究した^[19]。図 2-17 の実験装置を用い、イオン数個をイオントラップにトラップし、原子雲と重ねた。イオンを基底状態 $S_{1/2}$ にすると、蛍光測定によるイオンの減少は起こらず、レーザー照射によって励起状態 $P_{1/2}$ 、 $D_{3/2}$ を作ると、イオンの減少が認められ(図 2-19)、励起状態でしかイオンの減少が起こらないことがわかった。また、このイオンの減少が、Ca+イオンと Li 原子間の電荷交換であることを、トラップイオンの質量分析によって確認した(図 2-20)。イオントラップの電極に振動電圧を加えて、イオンを径方向に振動させると、イオンからの蛍光は、イオン振動の共鳴振動周波数 1020kHz 付近で大きく減少した(図 2-20)。966kHz の青色の点線は、別途測定された Ca+ の共鳴周波数 145kHz から計算された Li+イオンの共鳴周波数である。計算値 966kHz と、イオン振動の共鳴周波数 1020kHz とは、5% の差があるが、多成分イオンの質量分析におけるクーロン相互作用によるシフトで説明でき、Li+イオンの共鳴振動とした。このことから、イオンから原子へ電荷が移動したと結論した。

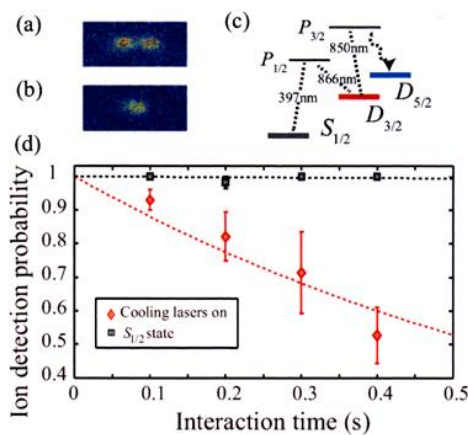


図 2-19 中性原子の励起の有無によるイオンの蛍光変化^[19]

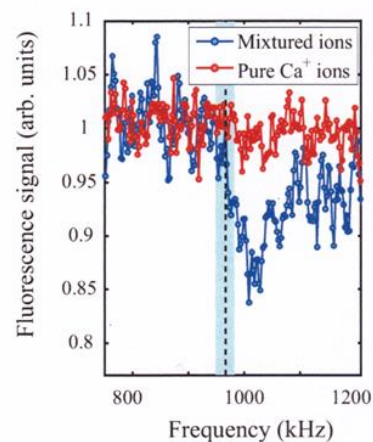


図 2-20 トラップイオンの質量分析結果^[19]

さらに、 ^{40}Ca +イオンのそれぞれの励起状態に対する衝突断面積を求め、相互作用が生じるポテンシャル状態を明らかにした^[20]。冷却レーザー (397nm) と、ポンピングレーザー (866nm、850nm) の照射を制御し、 $D_{3/2}$ と $D_{5/2}$ の励起状態を実現した。その上で、 ^6Li 原子をイオントラップへ導入し、 ^{40}Ca +イオンの減少を、0.2mK~1k の温度で衝突エネルギーを変化させ測定した。この測定による衝突断面積の測定結果を、図 2-21 に示す。なお、同図における実線は、ランジュバン散乱¹⁸を仮定した時の衝突断面積の理論値 σ_L 、点線は、実測値のフィッティングライン σ_{CE} である。 σ_L は $\sigma_L = (2\alpha Q^2/4\epsilon_0) \times E^{-1/2} \approx 3.3 \times 10^{-28} \times E^{-1/2}$ (α は ^6Li 原子の静的分極率、 Q は ^{40}Ca +イオンの電荷、 ϵ_0 は真空誘電率、 E は衝突のエネルギー) で表され、 $\sigma_{CE} = A \times \sigma_L$ で表したときの係数 A を図 2-22 に示す。 $P_{1/2}$ の衝突断面積は、S、P、D 状態の数の分布の測定値 (0.42、0.29、0.29) を使って、 $S_{1/2}$ 、 $P_{1/2}$ 、 $D_{3/2}$ の混合状態から、計算によって求めた。次に LiCa^+ のポテンシャルを計算し、擬交差¹⁹から、 $\text{Li}(2s)+\text{Ca}^+(3d)$ 状態が電荷交換の衝突の有力な入口であることを見出した。これらの結果によって、冷却原子における量子的な化学反応制御を実現するための、重要な情報が得られた。

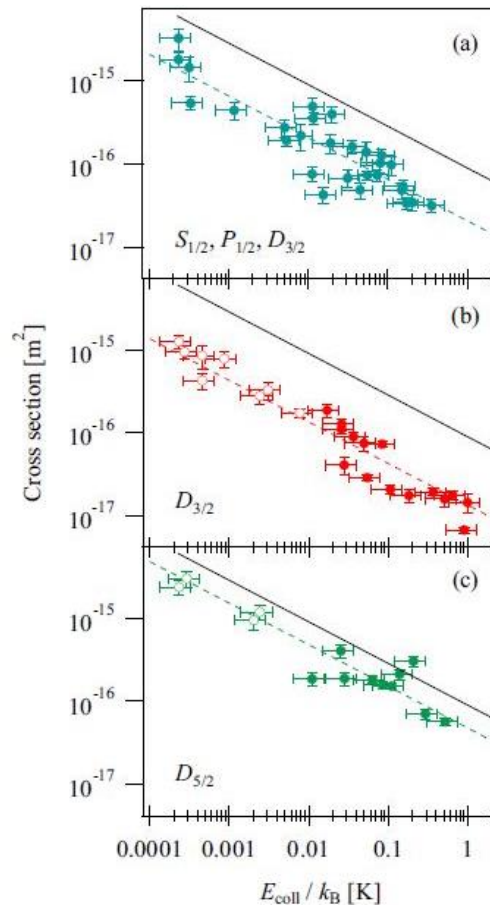


図 2-21 ^{40}Ca +イオンの内部状態による非弾性衝突断面積の測定結果。(a)は $S_{1/2}$ 、 $P_{1/2}$ 、 $D_{3/2}$ の混合状態による衝突断面積 (b)は $D_{3/2}$ 励起状態における非弾性衝突断面積 (c)は $D_{5/2}$ 励起状態における非弾性衝突断面積

¹⁸ 引力ポテンシャルに捕まり近距離で衝突する散乱のこと。衝突エネルギー E に対して衝突断面積は $E^{1/2}$ で変化する。

¹⁹ 異なる状態のポテンシャルが交差する点。一般に電子状態の遷移は擬交差で起こると考えられている。

TABLE I. A for various internal states of $^{40}\text{Ca}^+$ ions.

| $^{40}\text{Ca}^+$ internal state | A |
|--|-----------------------------|
| $S_{1/2}$ | $\lesssim 1 \times 10^{-3}$ |
| $D_{3/2}$ | 0.14 ± 0.01 |
| $D_{5/2}$ | 0.54 ± 0.03 |
| Mixed state of $S_{1/2}$, $P_{1/2}$, and $D_{3/2}$ | 0.23 ± 0.03 |
| $P_{1/2}$ | 0.65 ± 0.10 |

図 2-22 Ca イオンと Li 原子の電荷交換衝突における、衝突断面積の測定結果。 A はランジュバン散乱に対する $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの内部状態依存の衝突断面積の比である。

2.3 プロジェクト参加研究者の活動状況

グループリーダーの井上は、プロジェクト参画前の東京大学助教授から大阪市立大学の教授、上妻は東京工業大学助教授から東京工業大学の教授、向山は東京大学助手から電気通信大学の准教授へと、それぞれキャリアアップしている。また、博士研究員の小林は、NICT 研究員から東京大学助教を経て京都大学特定准教授、武井は分子科学研究所の助教、竹内は NICT 研究員を経て東京大学助教、堀越は東京大学助教、Zhang は中国人民大学の教授に着任し、Naidon は理化学研究所(理研)の研究員、福原はマックス・プランク研究所研究員を経て理研のユニットリーダーに転職し、衛藤は NICT 研究員を経て、学習院大学の助教に着任した。さらに、研究補助員であった相川は、インスブルック大学の博士研究員を経て東京工業大学の准教授へ着任し、遠藤は、東京大学の博士課程修了後フランス ENS の博士研究員への転職を果たした。

研究員と研究補助員、特に若手の博士研究員や研究補助員(学生)のキャリアアップは 10 名と、多数にわたっている。ERATO の終了時に博士過程を終了した相川が、30 代前半で東京工業大学の准教授になっているのは、その顕著な例である。

2.4 2章のまとめ

3 つの実験グループは、本プロジェクト終了後に分離独立し、各拠点に実験装置を移設し、再調整後、独自の方針で研究を継続した。

競争的資金について、上妻は「最先端研究開発支援 最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)」、および CREST の研究資金を獲得している。上妻以外の実験グループは、年間数百万円～1500 万円程度である。

期間中の発表論文のうち 2 件の論文、井上の「光会合による冷却分子生成」と、向山の「ユニタリー極限における普遍的な熱力学的関数の決定」が、8～9 年経過後の現在も、毎年確実に引用件数が増えており、その先進性と重要性が認められていると考えられる。本プロジェクト後の実験グループの発表論文数は、3 グループ合計で 12 件である。

各グループリーダーの、プロジェクト後の注目すべき研究成果項目を以下にまとめる。

(1) 相互作用制御グループ

①プロジェクトで得た冷却 $^{41}\text{K}^{87}\text{Rb}$ 極性分子による陽子・電子質量比の精密測定を行い、従来の 2.6 倍の精度で測定を達成した。

②同じ原子の組み合わせを使って、エフィモフ状態の同位体シフトの同定と、その理論的解明に成功した。

(2) 不確定性制御グループ

冷却原子を顕微鏡下に移送し、2次元に並べて観測する技術を開発した。

(3) 強相関量子制御グループ

①p波分子のBECに向けて、基礎データであるフェッシュバッハ共鳴における相互作用の強さや、弾性散乱断面積の測定を行い、フェッシュバッハ共鳴の、選択された軌道運動量状態の生成に成功した。

②冷却した中性原子とイオンの系での相互作用を研究し、中性原子とイオンの間の弾性衝突断面積を求め、中性原子とイオンの電荷交換による非弾性衝突が起こることを実証し、イオンのそれぞれの励起状態に対する衝突断面積を求めることに成功し、相互作用が生じるポテンシャル状態を明らかにした。

本プロジェクトとその後の研究成果について、海外の競合する研究グループとの比較を、成果の内容、発表時期についてまとめ、表2-6に示す。ユニタリー極限の熱力学的普遍関数の決定、Yb単一原子の観察、フェルミ粒子のp波BECの生成などは、世界にさきがけて観測、あるいは達成した成果である。

表2-6 世界の競合研究との比較

| 研究課題 | ERATOおよびその後の成果 | 海外の競合グループの成果 |
|-----------------------|---|--|
| 基底状態の冷却分子生成 | 2009年 $^{41}\text{K}^{87}\text{Rb}$ (ボゾン-ボソンの組み合わせで達成) | JILA: 2008年 $^{40}\text{K}^{87}\text{Rb}$ (フェルミオン-ボソンの組み合わせで達成 ²⁰) |
| ユニタリー極限の熱力学的普遍関数の決定 | 2010年 関数の決定に世界で初めて成功 | 2010年 カスラー・ブロッセル研究所(フランス・パリ高等師範学校)(LKB)が1ヶ月遅れで発表 ²¹ |
| Yb単一原子の観察 | 2010年 Yb原子の単一核スピンを世界で初めて観察 | 類似研究、発見できず。 |
| エフィモフ状態の観測 | 2011年4月 エフィモフ状態の束縛エネルギーを世界で2番目に決定 | 2010年11月 マックス・プランク研究所でエフィモフ状態の束縛エネルギーを世界で初めて決定 ²² |
| フェルミ粒子のp波BEC | 2008年 ^6Li でp波フェッシュバッハ分子生成に成功(本プロジェクト終了後も研究継続) | 世界中で撤退 |
| 陽子・電子質量比の測定 | 2015年基底状態のKRb冷却分子を使って 1.6×10^{-14} の精度で陽子・電子質量比を測定した(従来の約2.6倍の精度)。 | 2008年 SF_6 分子ビームによって、 4.2×10^{-14} の精度で測定が行われた ²³ 。 |
| 冷却原子の2次元トラップと顕微鏡下での観察 | 2015年 Yb原子(ボゾン)の2次元格子へのトラップと顕微鏡観察を実現。 | 2015年 MITはフェルミオン冷却原子 ^{40}K の顕微鏡観察を実現 ²⁴ 。 |

人材育成については、博士研究者全員が同等あるいはそれ以上のポストを得ており、助教になつている研究者が多数、特定准教授になつた研究者も1名いる。当時の学生のうち1名が、海外

²⁰ Ni KK et al., *Science*, 322(5899), 231-235, 2008

²¹ Nascimbène S et al., *Nature*, 463, 1057-1060, 2010

²² Lompe T et al., *Science*, 330(6006), 940-944, 2010

²³ Shelkownikov A et al., *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 100, 150801, 2008

²⁴ Cheuk L.W et al., *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 114, 193001, 2015

での研究成果により、現在准教授になっているのは注目に値する。

第 3 章 プロジェクトの成果の波及と展望

3.1 科学技術への波及と展望

本プロジェクトにおける、3 つのグループによる成果の波及と展望について、以下に述べる。

3.1.1 研究成果の科学技術への展開状況と期待

本プロジェクトの成果は、3 つの研究課題として展開している。

(1) 強相関物理の量子シミュレータ

高温超伝導に代表される強相関物理による物質内の様々な現象が注目されている。しかし、固体材料の中では、強相関現象のパラメータを変えて自由な実験を行うのが困難であり、理論の検証をしにくいいため、冷却原子を使った強相関物理の理解と検証は、冷却原子の研究の中で重要な課題の一つとなっている。

① p 波分子の超流動

高温超伝導は、従来知られていた超伝導メカニズムとは異なり、異方性を持つ d 電子によって生じていると考えられている。超伝導現象のメカニズムの深い理解のために、異方性を持つ p 波の冷却フェルミ原子(分子)を扱い、その集団が起こす超流動現象の研究は重要である。冷却 p 波分子の超流動が理論的に理解されると、その理論は高温超伝導へも適用できると考えられる。本プロジェクトでは、その第一歩として、従来実現していなかった、ゆるく結合した p 波分子の生成に成功したが、次のステップにおける、超流動を起こす p 波分子の BEC の実現には、原子のトラップからのロスが大きく達成できなかった。現在はより基本的な関係、すなわち磁場で制御する p 波相互作用について、磁場の強さとフェッシュバハ共鳴における相互作用の強さとの関係、ロスとの関係を定量的に調べている。p 波分子の重要性は知られているが、実験の難しさから、世界の実験グループは撤退している状況の中、向山が率いるグループが世界のトップを走っている。

② Yb 原子を 2 次元に複数並べ、顕微鏡下で観察、操作

この研究は、①とは全く異なる視点から、冷却分子の超流動へ迫る研究である。室温における電子のフェルミ縮退温度は約 10,000K である。その 1/100 の 100K 程度が高温超伝導の限界になっている。冷却原子においては、フェルミ縮退温度約 100nK に対して、1/100 の 1nK 程度での超流動のシミュレーションを行う必要がある。ボゾン原子で成功した顕微鏡技術を、フェルミオン原子に適用し、顕微鏡下で高温の原子を光ピンセットで除去し、1nK 程度の温度を目指している。この温度が実現すれば、冷却原子集団として興味ある現象が生じる可能性があり、その実現に向けて、世界的な競争が繰り広げられている。また、原子の並び方もこの技術で制御でき、原子の並び方の効果を知るためのシミュレーションも可能である。これは超伝導と固体結晶構造の関係性を研究する上で、重要な技術となる。

これら二つの研究のアプローチは異なるが、強相関物理のシミュレーションへの試みが着実に進展しており、成果が期待される。

(2) 化学反応の基礎の理解と制御

一般の化学反応は、結合の障壁を熱的に越えることによって成立している。冷却原子の分子生成には、全く異なる原理が使われており、2個の原子の結合へのプロセスの基礎となる。現在は、2つの冷却原子から冷却分子が生成するという単純なプロセスであるが、さらに発展させて、冷却分子と冷却分子が反応するプロセスにまで研究が発展すれば、分子の方向、回転、振動、および核スピンなどの、分子が持つ自由度に関する化学反応の基礎的な理解が進むと考えられる。また、現在の研究から、中性原子とイオンの化学反応についても、基礎的な理解が進むことが期待される。分子の化学反応、イオンの化学反応の両方において、全く新しい化学反応が開ける可能性がある。

(3) 超精密測定

冷却原子の超精密分光測定は、時間標準の新しい基準の候補となっており、実用化が近いと期待されている。一方、冷却分子も、原子にはない振動、回転等の様々なモードがあるため、超精密分光測定において魅力ある対象である。井上が率いたグループが測定した陽子・電子質量比は、理論上定数とされているが、宇宙的な時間においては、定数でない可能性がある。定数でないことが実験的に証明されると、従来理論の修正を迫る大発見と言える。このような定数は、微細構造定数等いくつかあり、その測定の精度向上は重要な研究である。冷却分子を使い、実際に超精密な検証ができることを示したことの意義は大きい。

3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成

中性子星の内部では、中性子の相互作用が非常に大きいことは予想されていた。冷却原子を使ったユニタリー極限での熱力学的普遍関数の決定により、中性子星研究者の注目を集めた。現在、中性子星のプロジェクト(科研費新学術領域研究:「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」)に本プロジェクト研究者(2名)が参画し、研究が進行している。

3.1.3 科学技術への波及のまとめと展望

本プロジェクトの発展として、高温超伝導の機構解明を目的にしたシミュレーションの研究、冷却分子やイオンによる化学反応の基礎研究、冷却分子を使った超精密測定への応用、という3つの方向へ展開している。さらに、本プロジェクトによるユニタリー極限の研究は、中性子星の研究という、異分野(天文分野)へも波及している。

3.2 社会経済への波及と展望

3.2.1 人材育成

このプロジェクトでは、2.2で記述したように、研究の中心となった博士研究者が全員、同等あるいはそれ以上の職位に着任しており、キャリアアップを達成している。助教になった研究者の中には大きなプロジェクトへ参加し、研究補助金を得たケースもある。海外からの博士研究者の中には、帰国し教授になっているケースもある。

本プロジェクトに参画した大学院生(あるいは学生)に関しては、博士課程を経た研究者が海

外の博士研究員や、国内の助教になっており、最も顕著なケースでは海外の大学で博士研究者として優れた成果が評価され、30代前半で准教授になった研究者もいる。

以上から、本プロジェクト終了後、有為な人材を育て、社会に送り出した社会的波及効果は大きいと言える。

3.2.2 冷却原子技術の応用

冷却原子の研究は基礎的な研究であり、すぐに実用化が見込める応用は多くない。現在、期待されているのは、時間標準への採用を目指して研究されている原子時計への展開である。原子時計については、既に多くの報道がなされており、周知の部分が多いため、ここでは原子時計以外の応用について記述する。

冷却原子やイオンを量子ビットとする量子コンピュータが検討されており、複数の原子間のクラスター状態を使った量子コンピュータが提案されている。このタイプの量子コンピュータでは、特殊な量子もつれの原子集団(クラスター状態)について、各原子について射影測定を次々と繰り返すことにより、計算を進めていくのが特徴である。これらが実用化すれば、社会的なインパクトは大きい。

また、アトムチップへの応用もあげられる。アトムチップとは、半導体集積回路上に原子やイオンをトラップし、そこに量子コンピュータや、原子干渉計を実現する研究である。アトムチップ化で、半導体上に作られた回路に磁場や電場を発生させ、冷却原子やイオンをトラップして、原子やイオンを保持するだけでなく、移送や様々な制御・観測を行うことができ、微細かつ複雑な原子の操作が可能となり、量子コンピュータの量子制御や、原子干渉計の精密な制御・観測が可能となる。また冷却原子による物質波を使った干渉計では、豊富な原子源と構成により、力の観測や精密測定に利用できる。これらの研究は日本電信電話株式会社(NTT)²⁵、東京大学(香取研究室)²⁶、電気通信大学(中川研究室)²⁷等で研究されている。

3.2.3 社会経済への波及のまとめと展望

基本的に本プロジェクトは基礎研究であり、直ちに応用に結びつく研究内容ではない。しかし、冷却原子の領域では、その芽ともいえるべき研究が幾つか行われている。量子もつれのクラスター状態を使った量子コンピュータや、半導体の上に冷却原子をトラップし、量子コンピュータや高精度の原子干渉計を作ることなどを目的にしたアトムチップの研究へと進展している。これらの萌芽的な研究が、社会的に有用な成果へ早期に結びつく可能性がある。また、世界における冷却原子分野の急速な発展に貢献すべく、多数の若手人材を送り出したことも、本プロジェクトの直接的な社会への波及効果とあげられる。

²⁵ <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20070629/>

²⁶ http://www.amo.t.u-tokyo.ac.jp/ynbw/02_theme.html

²⁷ <http://www.uec.ac.jp/research/information/opal-ring/0000501.html>

【引用文献】

- [1] Kishimoto T. Kobayashi J. Noda K. Aikawa K. Ueda, M. Inouye S. "Direct evaporative cooling of K-41 into a Bose-Einstein condensate", *PHYSICAL REVIEW A*, 79, 031602(R), 2009
- [2] Aikawa K. Akamatsu D. Hayashi M. Oasa K. Kobayashi J. Naidon P. Kishimoto T. Ueda M. Inouye S. "Coherent transfer of photoassociated molecules into the rovibrational ground state", *Physical Review Letters*, 105, 203001, 2010
- [3] Takeuchi M, Takei N, Doi K, Zhang P, Ueda M, Kozuma M, "Single-nuclear-spin cavity QED", *PHYSICAL REVIEW A*, 81, 062308, 2010
- [4] Takei N, Takeuchi M, Eto Y, Noguchi A, Zhang P, Ueda M, Kozuma M, "Faraday rotation with a single-nuclear-spin qubit in a high-finesse optical cavity", *PHYSICAL REVIEW A*, 81, 042331, 2010
- [5] Noguchi A, Eto Y, Ueda M, Kozuma M, "Quantum-state tomography of a single nuclear spin qubit of an optically manipulated ytterbium atom", *PHYSICAL REVIEW A*, 84, 030301(R), 2011
- [6] Eto Y, Noguchi A, Zhang P, Ueda M, Kozuma M, "Projective Measurement of a Single Nuclear Spin Qubit by Using Two-Mode Cavity QED", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 106, 160501, 2011
- [7] Inada Y, Horikoshi M, Nakajima S, Kuwata-Gonokami M, Ueda M, Mukaiyama T, "Critical Temperature and Condensate Fraction of a Fermion Pair Condensate", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 101, 180406, 2008
- [8] Inada Y, Horikoshi M, Nakajima S, Kuwata-Gonokami M, Ueda M, Mukaiyama T, "Collisional properties of p-wave Feshbach molecules", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 101, 100401, 2008
- [9] Horikoshi M, Nakajima S, Ueda M, Mukaiyama T, "Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas", *Science*, 327, 442, 2010
- [10] Nakajima S, Horikoshi M, Mukaiyama T, Naidon P, Ueda M, "Nonuniversal Efimov Atom-Dimer Resonances in a Three-Component Mixture of Li-6", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 105, 023201, 2010
- [11] Nakajima S, Horikoshi M, Mukaiyama T, Naidon P, Ueda M, "Measurement of an Efimov Trimer Binding Energy in a Three-Component Mixture of Li-6", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 106, 143201, 2011
- [12] Naidon P, Ueda M, "Possible Efimov Trimer State in a Three-Hyperfine-Component Lithium-6 Mixture", *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 103, 073203, 2009
- [13] Kato K, Wang Y, Kobayashi J, Julienne P S, Inouye S, "Isotopic shift of atom-dimer Efimov resonances in K-Rb mixtures: Critical effect of multichannel Feshbach physics", submitted, arXiv:1610.07900, 2016 (submitted: Physical Review Letters)

- [14] Miranda M, Nakamoto A, Okuyama Y, Noguchi A, Ueda M, Kozuma M, "All-optical transport and compression of ytterbium atoms into the surface of a solid immersion lens", *PHYSICAL REVIEW A*, 86, 63615, 2012
- [15] Miranda M, Inoue R, Okuyama Y, Nakamoto A, Kozuma M, "Site-resolved imaging of ytterbium atoms in a two-dimensional optical lattice", *PHYSICAL REVIEW A*, 91, 63414, 2015
- [16] Nakasuji T, Yoshida J, Mukaiyama T, "Experimental determination of p-wave scattering parameters in ultracold 6Li atoms", *Physical Review A*, 88, 12710, 2013
- [17] Waseem M, Zhang Z, Yoshida J, Hattori K, Saito T, Mukaiyama T, "Creation of p-wave Feshbach molecules in the selected angular momentum states using an optical lattice" , *Journal of Physics B*, 49, 204001, 2016
- [18] Haze S, Hata S, Fujinaga M, Mukaiyama T, "Observation of elastic collisions between lithium atoms and calcium ions", *PHYSICAL REVIEW A*, 87, 52715, 2013
- [19] Haze S, Saito R, Fujinaga M, Mukaiyama T, "Charge-exchange collisions between ultracold fermionic lithium atoms and calcium ions", *PHYSICAL REVIEW A*, 91, 32709, 2015
- [20] Saito R, Haze S, Sasakawa M, Nakai R, Raoult M, Da Silva H, Dulieu O, Mukaiyama T, "Characterization of charge-exchange collisions between ultracold 6Li atoms and 40Ca^+ ions" , arXiv:1608.07043, 2016 (accepted for publication in Physical Review A)