

ERATO「上田マクロ量子制御」プロジェクト 追跡評価報告書

総合所見

冷却原子気体で構成されるマクロ量子系では、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)等の量子力学的効果が強く現れ、その制御手法の確立は強相関物質科学や量子情報科学等でのイノベーション創出をもたらすものと期待されている。本プロジェクト発足当時、世界の冷却原子研究機関が大規模に研究を推進している状況に対して、国内では規模と研究費に関して若手研究者が苦勞し、孤軍奮闘している状況にあった。本プロジェクトは、世界的に著名な理論研究者である上田研究総括がその状況を危惧し、若手研究者による研究集団を立ち上げ、世界に情報発信することを目的として発足した。研究期間中に達成された研究成果は世界の研究拠点と肩を並べ、世界から認知される卓越した水準に至ったと評価された。この研究レベルは研究終了後も3名の実験グループのリーダーを初めとする研究参加者により継承され、発展を続けており、高く評価できる。

プロジェクト終了後、三つの実験グループはそれぞれ独立して研究を発展させ、相互作用制御グループでは「冷却原子を用いた陽子・電子質量比の世界最高精度の測定」、「エフィモフ状態の同位体シフトの同定と理論的解明」、不確定性制御グループでは「冷却原子を顕微鏡下で移送・観察する技術での ^{174}Yb 原子BECの実現」、「超流動実現を目指した二次元光格子による冷却原子のトラップ・顕微蛍光観測の実験」、強相関量子制御グループでは「p波分子のフェッシュバハ共鳴における相互作用強度・弾性散乱断面積の測定と選択的な軌道運動量状態の生成」、「冷却した中性原子とイオンの混合系においてイオンから原子への電荷移動の観測」等、いずれも世界的に水準の高い研究成果が報告されている。

これらの研究成果は、量子シミュレータとして高温超伝導をはじめとする強相関現象のメカニズムを解明して材料開発に大幅な効率化をもたらすこと、化学反応の基礎的なプロセスを理解して新しい物質合成に道を開くこと、冷却原子を用いた超精密測定により従来の常識を打ち破る研究に発展すること、冷却原子間の量子状態制御を応用した量子コンピュータや原子干渉計を小型に実装するアトムチップを実現させることが期待され、結果的に社会的・経済的に大きなインパクトをもたらすと考えられる。特に、極低温化学反応素過程の解明、アトムチップの実現は参加メンバーが大型の競争的資金を得て現在取り組んでいる研究課題であり、その実現が期待される。

人材育成ではグループリーダー3名(井上、上妻、向山)が全員、マクロ量子系物理の分野を牽引し得る実力のある大学教授として研究室を構えるとともに、博士研究員、研究補助員としての参加者もほとんどがキャリアアップを果たしており、本プロジェクトより、優れた研究者が多数輩出したと言える。また一方、最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)のような大型の競争的資金を獲得して研究成果の社会展開へと研究を継続している例も見られ、特に優れた成果を継続して挙げていると評価する。

以上のことから、科学技術の源流を作り、社会・経済の変革をもたらす科学技術イノベーションの創出に貢献するという本プロジェクトの目的は、プロジェクト終了後においても高い水準で達成されていると評価できる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

本プロジェクトは、(1)分子生成と制御を目的とした相互作用制御グループ、(2)原子スピン状態の観測、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、(3)強相関系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、からなる 3 つの実験グループと、実験グループを支援して方針を導く理論グループで構成された。3 つの実験グループは研究終了後、それぞれの拠点に実験設備を移設して、それぞれの方針のもとに研究を継続、発展させている。

相互作用制御グループでは、研究期間中に確立した $^{41}\text{K}^{87}\text{Rb}$ の基底状態の分子の生成技術を活用して、陽子・電子質量比の精密測定を実現し、これまでの報告の 2.6 倍の世界最高精度を達成した。この実験は陽子・電子質量比不変性の検証に寄与する大きな成果である。また、同じ原子系でエフィモフ状態の同位体シフトを同定するとともに、スピンの効果を取り入れたスピノルモデルで現象を解明することに初めて成功した。

不確定性制御グループは、研究期間中に目指した冷却原子によるクラスター量子コンピュータから、より実現性が高く有用であると考えられる量子シミュレーションに目標を変更して研究成果を発展させている。まず、冷却した多数個の ^{174}Yb 原子を顕微鏡下に移送して観測する技術の開発に成功し、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を実現した。続いて顕微鏡下に生成した二次元光格子に原子を配置し、個々の原子を観測することに成功した。今後更なる冷却により、トラップされた原子の超流動の観測が期待される。

強相関量子制御グループは、研究期間中に p 波分子の生成に成功したが、分子の損失制御ができずに超流動には至らなかったため、損失制御の基礎となるフェッシュバハ共鳴の定量的な研究に取り組み、弾性散乱断面積等の散乱パラメータの決定や選択的な軌道運動量の生成に初めて成功した。これらの結果は p 波分子超流動実現の基礎となる成果である。また、研究期間中に培われた精密分光測定技術の応用として、冷却原子(^6Li)と原子イオン($^{40}\text{Ca}^+$)の混合系での散乱素過程に関する研究を立ち上げ、イオンから原子への電荷移動の観測に成功している。この成果は冷却原子における量子力学的手法による化学反応制御へと繋がる重要な意義を持つ。

以上のことから本プロジェクト終了後も、研究成果の発展状況や活用状況は優れているものと評価する。

2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

冷却原子は、高温超伝導をはじめとする強相関物理の量子シミュレータとして期待され

ている。プロジェクトの成果である p 波分子は異方性を持ち、この点で同じく異方的なペアリリングを形成する高温超伝導現象と類似している。しかしながら実験的困難さから p 波分子超流動は実現されていない。世界的に類似の実験からの撤退が進む中で、本プロジェクト終了後の研究ではその障害となっている物理現象の定量的な理解を実現し、今後の研究で取り組むべき課題を明らかにした。また、プロジェクト終了後の成果である二次元光格子中に配置した Yb 原子は、固体結晶の量子シミュレータとして有用であり、1nK 程度の温度が実現できれば、種々の興味深い量子現象が発見される可能性があり、世界的な競争の中で先陣を切る研究成果が挙がることが期待される。

一方、化学反応の基礎的なプロセスを理解し、反応を制御するための知見を得る上でも、冷却原子の研究は重要な役割を担うことができる。本プロジェクトでの冷却原子の分子生成の研究成果は、さらに冷却分子と冷却分子の反応まで進めば、分子の方向、回転、振動などの自由度に関する化学反応プロセスの基礎的研究に発展することが期待される。また本プロジェクトの成果展開として実施されている中性原子と原子イオン相互作用の研究は極低温での化学反応の素過程を解明する上で非常に重要な取り組みであり、これらの化学反応の理解からまったく新しい化学反応への道が拓けることが期待される。

また、本プロジェクトの成果の一つである冷却原子気体のユニタリ極限での振る舞いの研究による知見は、異分野である中性子星の研究へと波及しており、新分野創出に貢献したと認められる。また、原子冷却のために開発した種々の超精密計測・制御技術・光技術は、物性研究に限らず様々な研究分野への波及効果も考えられ、プロジェクト終了後に実現した陽子・電子質量比の世界最高精度での精密計測はこの波及効果を示すものである。

(2) 研究成果の応用に向けての発展

本プロジェクトと終了後の研究成果は物理・化学の基礎的な学問領域を切り拓くものであり、短期間での社会実装をもたらすものではない。しかし、将来的に以下の分野で大きな社会的・経済的なインパクトを生むことが期待される。

量子シミュレータは古典計算機では本質的に困難な量子系のシミュレーションを可能とし、量子現象の理解と制御に有用なツールとして期待されている。冷却原子を用いた量子シミュレータは高温超伝導の機構解明等の基礎的な問題への適用が考えられるのみならず、将来的には材料開発の効率化などに寄与すると期待される。

冷却原子を用いた化学反応の素過程の理解と制御は、従来の方法では合成が困難であった物質の合成に道を拓く可能性があるとして期待される。強相関量子制御グループの向山が JST さきがけの研究者として取り組む研究課題「極低温イオン・原子混合系で探求する極低温化学反応過程」は、この方向への研究発展の一環と認められる。

冷却原子の超精密計測・制御技術は、冷却原子を集積回路上に配置して量子コンピュータや原子干渉計として実験室の外で冷却原子を活用する「アトムチップ」技術へ発展すると期待されている。不確定性制御グループの上妻が JST CREST で研究代表者として取り組んで

いる研究課題「ポケットサイズレーザー冷却システムの開発」、および JST 未来社会創造事業で実施中の研究開発課題「冷却原子・イオンを用いた高性能ジャイロスコープの開発」はこの方向への研究発展の取り組みの一環と認められる。

(3) 参加研究者の活動状況

上田研究総括が本プロジェクトで目指した「冷却原子の研究分野、特に実験研究における若手研究者の育成」という目標は、グループリーダー、博士研究員、研究補助員のプロジェクト期間中、および終了後の研究活動とその成果、キャリアアップの状況などから十二分に達成されたと評価される。

3名のグループリーダーは大阪市立大学(井上)、東京工業大学(上妻)、大阪大学(向山)の教授として研究室を持ち、それぞれの研究活動を発展・展開しており、日本及び世界の冷却原子研究において重要な役割を担いつつある。博士研究員の多くが大学、国立研究開発法人で准教授、助教、ユニットリーダー、主任研究員等のポストを得ている。研究補助員として参画した大学院生は海外での博士研究員や大学の助教となっており、顕著なケースでは 30代前半で准教授へキャリアアップした例も見られる。

研究参加者は、プロジェクト期間中および終了後に多くの競争的研究資金を獲得して更なる発展に向けて研究を実施している。この中には最先端・次世代研究開発支援プログラム、JST の CREST、さきがけ、および未来社会創造事業や科研費新学術領域研究等、大型の競争的研究資金が多数含まれ、プロジェクト終了後も高い水準の研究活動が実施されていることが伺える。

以上のことから本プロジェクト終了後に、研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果は優れているものと評価する。

3. その他

本プロジェクトでは理論研究者として名高い上田総括が、当時新進気鋭の 3 人の若手実験家をグループリーダーに抜擢し、開始当初は脆弱な基盤しか持っていなかった国内の「冷却原子系の物理」の研究を、短期間で一挙に世界に伍すことのできる水準にまでもっていった点で、当に特筆に値する営みであった。これを可能ならしめたのは、(1)物理の研究者であれば誰もが奮い立ち、自然科学上のオープンクエスションに答えを与えるような本質的に重要で挑戦のしがいのある研究テーマを目標に掲げ、メンバーの意欲を最大限に引き出したこと、(2)冷却原子系の分野において広い視野と研究動向についての鋭い洞察力を有する総括と、高い技術力と物理に対する深い理解に裏付けられた強いモチベーションを有する 3 人のグループリーダーが、実験遂行の過程で生じた問題点や疑問を常時共有して議論することで、最も効果的に研究上の障害を乗り越えて正しい方向を選択し続けることが出来たこと、(3)意識の高い優秀な若手メンバーを一箇所に集めて、研究の進行状況に関する情報を共有し、良い意味で競争的な環境におくことで連帯感と切磋琢磨を促したこと、が挙

げられる。

プロジェクト期間中の論文は被引用数も多く、最近でも引用が増えているのは高く評価できる。一方、プロジェクト終了後の実験グループの論文に関しては、やや数が少なく、引用も大きくは伸びていない。冷却原子の研究分野では、一般に論文数は多くないようであるが、今後様々な形での情報発信が期待される。プロジェクトで上手く機能した理論研究者と実験研究者の共同研究体制は、この分野では特に重要と思われるので、今後とも共同研究が展開されることを期待する。原子冷却のために開発した種々の超精密計測・制御技術・光技術は、物性研究に限らず様々な研究分野への波及効果も考えられ、広い分野の学会活動に加えて、近い将来の知財化や産業界への情報発信にも期待したい。