

ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト中間評価報告書

【研究総括】 上田 正仁 (東京大学大学院理学系研究科／教授)

【評価委員】 (あいうえお順)

高橋 義朗 (京都大学大学院理学研究科／教授)

坪田 誠 (大阪市立大学大学院理学研究科／教授)

早坂 和弘 (情報通信研究機構神戸研究所／主任研究員)

山下 眞 (NTT 物性科学基礎研究所／主任研究員)

評価の概要

物質を構成する粒子にはフェルミ粒子とボース粒子の2種類があり、量子統計性の違いのため、低温においてそれぞれの粒子集団は全く異なる振る舞いをする。ボース粒子を極低温まで冷却すると、ボース＝アインシュタイン凝縮 (BEC) と呼ばれる巨視的な量子状態が生まれ、近年のレーザ冷却技術の進歩は希薄中性原子気体で BEC を実現し、今や物性科学や量子情報技術などへの関わりを議論する上でも、BEC は、世界的に活発な研究が繰り広げられている舞台となっている。

このような状況において、上田正仁・東京大学大学院理学系研究科教授を研究総括とする「ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト」は、BEC の理論研究を先導してきた同氏の実績を踏まえ、単一量子系のもつ高い制御性を原子集団や人工分子 (マクロ量子系) に導入し、さまざまなタイプの「量子制御」の技術を確立することによって、マクロ物質の包括的理解、およびその量子情報や超精密測定といった将来の応用展開へ向けた、基礎的知見の獲得を追究するものである。

我々評価委員は2008年11月6日に、上田総括およびプロジェクトの構成員に対してヒヤリングを行った。研究領域 (プロジェクト) の設定、運営、およびそこから得られている研究成果の質のいずれにおいても申し分のない状況であると評することができる。研究総括の理論やアイデアを実証しようとする、海外の研究レベルを体験した若きグループリーダーや研究員らが中心となって、実験システムのセットアップを極めて短期間で成し遂げ、世界の名だたる研究者が常に注目する”AMO (Atomic, Molecular, and Optical) Physics”の研究拠点として認知されるに至っている。これまでの3年間は研究そのものの遂行を重視するという、研究総括の方針が色濃く反映されたプロジェクト運営がなされてきた。それがこのような短期間での研究体制の立ち上げを可能にしたのだが、残る研究期間においては、質量ともに十分な研究成果をこれまで以上に発信することが強く望まれるであろう。

以上の点から、ERATO プロジェクトとして、極めて卓越した研究水準にあると認められ、かつ今後にも十分に期待できると認められる。

1. 研究プロジェクトの設定および運営と今後の見込

1-1. プロジェクトの全体構想

1920年代にアインシュタインによって理論的に予測されたボース＝アインシュタイン凝縮（Bose-Einstein Condensation ; BEC）は、レーザ冷却などの最先端光学技術の目覚ましい進歩により、約70年の歳月を経た1990年代になって希薄中性原子気体で実現した。そしてそれは、制御および可視化が可能な新しい量子凝縮状態を手に入れるという意味で物理のブレークスルーであることはいまでもなく、例えば量子情報技術などにおいて、それまでの単一原子や単一光子（マイクロ量子物質）のみならず原子集団や人工分子（マクロ量子物質）もまた、制御する対象となり得たことを意味する、新たな時代の幕開けでもあった。BEC実験の先駆的研究¹で2001年ノーベル物理学賞を受賞したコーネル、ワイマンのいるJILA（米・コロラド）や、同じく受賞者であるケターレのいるMIT（米・マサチューセッツ）、欧州ではマックスプランク量子光学研究所（MPQ ; 独・バイエルン）などを中心に、現在、世界的な研究競争が繰り広げられている。

このような世界的な状況下で、「ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト」は2005年9月に産声を上げた。研究総括である上田正仁・東京大学大学院理学系研究科教授は、本来BECの理論研究者として著名でありながらも、ERATOでは、実験研究を主導するスタイルを貫いている。単一量子系のもつ高い制御性をマクロ量子系に導入し、原子（分子）間相互作用や原子-光相互作用、量子力学的不確定性関係を高精度で制御する方法を確立し、新たな物理現象を効率的に探索するだけでなく、光による物質パラメータの究極的制御という観点において、物質科学（強相関係など）との接点を紡ぎ、かつ新しい量子情報技術の基盤となる技術を創出する役割を担い、戦略目標「光の究極的及び局所的制御とその応用」に資することに根ざした、新しい研究領域の開拓に力を注いでいる。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

ERATOプロジェクトは、上記のような全体構想の実現へ向けて、3つの実験グループおよび各々を理論面でサポートするグループの、計4グループからなる。

- (1) 相互作用制御グループ（井上慎 グループリーダー）： 異種の原子よりなる極性分子を極低温で作成し、従来の原子系冷却気体では不可能であった新しいマクロ量子物質を創出し、そこで発現する新現象を探索する。
- (2) 不確定性制御グループ（上妻幹旺 グループリーダー）： スピンと光子を対象に、量子力学的不確定性関係を制御する方法・技術の開発を行う。
- (3) 強相関量子制御グループ（向山敬 グループリーダー）： 固体物理の本質的問題（相互作用の強さなど）を、人工量子物質を用いて解明するとともに、さら

¹ 正式な受賞理由は、“for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates”である。

なる新しい現象の探索を行う。

(4) 理論グループ(上田総括が兼務): 3つの実験グループをサポートする研究を行うとともに、新たな理論的業績を生み出すなど先駆的な研究を進めていく。プロジェクトの要となる実験グループを実質的に動かす各グループリーダーは、プロジェクト発足時はいずれも35歳以下の若い研究者でありながら、積極的に抜擢された人材であり、それは上田総括の次世代の研究者を育成しようという意欲の表れでもある。またプロジェクトは、これらのグループが互いに緊密に連携することを期待して、1つの研究サイト(東京大学工学部9号館)に置かれることとなった。我々評価委員は、中間評価ヒヤリングが行われた際(2008年11月6日)にプロジェクト内の実験設備を見学したが、全くのゼロの状態から、レーザ・光学・検出システムが十二分に稼働する状態までに立ち上がっており、ERATOプロジェクトとしての研究活動の高さを物語っている事実である。また高い研究活動を維持するために、各グループが1つの研究サイトに集中している利点を用いて、毎週1回の英語によるグループミーティングが開催されている。そこでは構成員を互いに切磋琢磨させるとともに、強い連帯意識を持って世界をリードしようという、上田総括の高い意識が反映されている。

1-1. および1-2. を踏まえて、本ERATOプロジェクトの設定および運営と今後の見込などに対して、我々評価委員としての所見を改めて整理する。BEC理論を先導する研究者のひとりである上田総括は、若くして才能溢れるグループリーダーをはじめとした研究者集団をERATOの枠組みで組織しているが、それは原子物理学や物性物理学、量子光学、量子化学、量子情報といった異なるバックグラウンドを有する知識者集団でもある。そしてその中では、グループの特性や達成目標の難易度に応じた研究スケジュールを設定しつつ、プロジェクト全体としてマクロ量子系の未踏領域を切り拓こうとする野心的取り組みが実践されている。まさに、「ヘテロな集団」により、「新しい科学技術の流れ」を産み出そうとするコンセプトのもとに設定および組織されたプロジェクトであり、ERATOの趣旨にも極めて合致したものであると認められる。

研究総括の理論やアイデアを実証しようとする、海外の研究レベルを体験した若きグループリーダーや研究員らは、世界的に稀なスピードで研究を進展させることに成功している。現在までの研究成果は、次節以降で詳細に述べるように、中間評価の段階から既に世界的にも評価されているものであると認められる。

システムのセットアップも含め、極めて短期間でこうした水準に至らしめ、世界の名だたる研究者が常に注目する“AMO (Atomic, Molecular, and Optical) Physics”の研究拠点として認知されるに至っている。これらの点で、プロジェクト後半においても秀でた成果がさらに期待できると認められる。しかしながらその研究活動においては、論文化など「目に見える成果」へと結実させることを一層加速し、本プロジェクトが世界的に高い水準にあることを確たるものとするを、この場で強く提言しておきたい。

[研究プロジェクトの設定および運営と今後の見込]

a+ (特に優れて的確かつ効果的である)

〔研究活動の状況〕

a+ (特筆して望ましい研究展開を示しており、今後にもさらに期待できる)

2. 研究成果の現状と今後の見込

2-1. 相互作用制御グループ

極低温の極性分子を生成し、従来の原子系冷却気体では不可能であった新しいマクロ量子物質を創出するとともに、そこで発現する新現象を探索することを大きな目標と定めている。ここでは、高温の極性分子を出発点とし、これを極低温まで冷却する方法（直接法）ではなく、極低温まで冷却された異種原子を出発点とし、これらを会合させる方法（間接法）を採る。それは、単一の冷却原子どうしを「つなぐ＝反応させる」という究極の化学操作であり、「スーパーケミストリー」という新たな分野を切り拓こうとしている。冷却原子の分野でも未開拓なテーマであるが、海外での先行グループ（JILA）や競合グループ（MIT, MPQ など）の活動も目覚ましく、現在非常に活発な研究競争が繰り広げられている。結論から述べると、現在の本グループの研究の進捗状況は、そうした先行グループに十分肉薄するレベルにまで到達しており、またプロジェクト全体で当初設定した達成目標を、大きく上回るペースで推移しているといえる（システムのセットアップを含め、わずか3年を経過したに過ぎないことを特筆しておく）。

本グループでは、用いる原子種（同位体）および極性分子の生成のフェッシュバッハ共鳴による制御という点に高い独自性を有し、現在までに、①詳細な議論に基づいた原子種の組み合わせ（ ^{41}K - ^{87}Rb ）の選択と②冷却方法の確立を完了させた。 ^{41}K 原子の単独 BEC、および ^{41}K 原子と ^{87}Rb の同時 BEC を達成した意義は大きく、いよいよフェッシュバッハ共鳴による ^{41}K - ^{87}Rb 極性分子の生成は、目前に迫ったと見られる。分子の生成という大きな目標が達成されれば、さらにはそれを光学格子（周期ポテンシャル）に導入することによって、新しい秩序状態を目標とした物性探索を行うという可能性が広がる。研究の今後の進捗状況に応じて、その具体化へと進んでいただきたい。

原子種の選定に始まり、冷却方法の確立、原子種固有の散乱パラメータの測定、狭線幅レーザの開発、高分解能の分子分光測定装置の開発など、周辺の基盤技術を培いながら、グループとしての目標達成に向け、綿密に計画を練って研究を進めているという印象を受けた。理論グループとの共同研究も功を奏しており、必要なインフラがほぼ整った段階での、今後の研究の一層の進展に期待したいところである。なお上述のように、世界的との競合がいよいよ本格化する中で、惜しむらくはこれまでに得られた非常に優れた成果がいまだ論文として公表されていないことであり（ヒヤリングを行った2008年11月現在）、このことについては、評価委員の総意として論文発表することを強く提言しておきたい。

2-2. 不確定性制御グループ

量子力学における観測問題の制御は、新たな状態制御の道を切り拓くものとして、非常に重要なテーマである。観測による非ユニタリーな過程により、系にどのような擾乱が生じるのか、不確定性関係にどのような影響が現れるのかについては、不明な点が多い。初期の量子力学の研究に見られるような観念的な考察ではなく、冷却原子気体と最先端の測定技術を用いてこの問題に迫り、物性物理や超精密測定、量子情報の理解につなげようとしている。

このテーマを進めるにあたりグループでは、欧米の先行グループが取り組んでいるアルカリ原子ではなく、磁場の擾乱に強く量子ビットとしては理想的な ^{171}Yb 原子を選択した。単一 ^{171}Yb 核スピンと単一光子の相互作用に着目し、微小共振器系による波長 556nm での、単一 Yb 原子の実時間観測とそのファラデー回転の観測などに成功したことは、このグループのアクティビティの高さを象徴する質の高い研究成果であるといえる。

これらの成果を達成する背景には、グループが絶えず試行錯誤および克服してきた技術的問題も見逃せない。中でも初期に取り組んだ、紫外領域（波長 399nm）での実時間観測では、使用したミラーの真空中での経時劣化が判明するなど、現存する技術面の限界と課題を明らかにした点でも高く評価される。

中間評価の時点までに必要な基盤技術が揃い、また残る期間での研究計画も十分に練られている。これまでの進捗具合やアクティビティを考慮すると、波動関数の修復や集団スピンの極限スクイーミング、小澤の不等式の実験による検証などの課題は達成可能であろうし、それらは、関連分野に多大なインパクトをもたらすものでありうと期待できる。またこの研究が発展することによって、複数個の原子に計算機能を持たせることができるクラスター量子計算機への応用にも現実味が増す。

量子力学的不確定性をマクロな冷却原子集団を用いて制御しようとするコンセプトは、非常に野心的かつ難易度の高い課題であるが故に、ミクロ系の決定論的量子制御からのアプローチであるが、Yb 原子ならではの特徴を活かし、マクロ系の制御を実現し、量子力学の根本原理に迫るような成果を期待したい。なお相互作用制御グループと同様、これまでに得られた非常に優れた成果をいち早く論文発表することについても、ここに提言しておきたい。

2-3. 強相関量子制御グループ

フェルミ統計に従う冷却 ^6Li 原子気体を用いて、物性物理で長年研究されてきた多体効果を探究しようとする非常にチャレンジングなテーマを設定するなどしている。フェッシュバハ共鳴を通して原子間の相互作用を自由に制御できる冷却原子の利点を最大限に活かせば、高温超伝導の発現メカニズムなどこれまでに物性物理で未解決である問題も解明できる期待感を抱かせる。冷却フェルミ原子の実験は、ボース原子系に比べて蒸発冷却が難しいなど多くの難点があるにもかかわらず、得られる成果のインパクトの大きさから、欧米を中心として現在激しい競争下にあるのが現状である。

JILA や MIT のグループなどに比べて遅れて研究をスタートさせたにもかかわらず、わずか 1 年で ^6Li 原子気体のフェルミ縮退や $^6\text{Li}_2$ 分子の BEC に成功し、その後も、

s 波フェッシュバツハ共鳴による BEC-BCS クロスオーバー、p 波フェッシュバツハ共鳴を用いた ${}^6\text{Li}$ の p 波分子の生成にも取り組んでいる。

「BEC-BCS クロスオーバー」は非常に興味深い成果として、関連する研究者の大きな注目を集めている。フェッシュバツハ共鳴点でのユニバーサリティー（共鳴点を含むある領域の相互作用で、転移温度が一定になること）は、従来の研究成果および理解とは異なるものであり、今後詳細な理解を進めていく上では、理論グループによるサポートが必要不可欠であろう。また p 波フェッシュバツハ共鳴を用いた ${}^6\text{Li}$ の p 波分子の生成およびその振る舞いの詳細な解析にも成功していることも、高く評価することができる。ここから p 波超流動が実現するかどうかはまだまだ容易ではないが、寿命を延ばす工夫を施すこと等により、その実現へ着実に近づけてもらいたい。p 波超流動の代表例は超流動 ${}^3\text{He}$ であるが、この場合クーパー対を形成するための引力相互作用は定量的には必ずしも十分に解明されているとはいえない。 ${}^6\text{Li}$ の p 波超流動が実現すれば、相互作用が明らかでかつ制御可能であるという意味において、非常に重要な新奇量子凝縮相を与えることになる。

このような非常に優れた成果を立て続けに生み出すとともに、*Physical Review Letters* 誌への公表など、目に見えるかたちに結びつけているなど、非常に好ましい進捗状況であるといえる。グループリーダーをはじめスタッフ全員が周到に研究計画を立て、目標に向かって最短距離で進んでいることが理由のひとつであろう。既に世界に比肩する実力を持ったグループであり、今後も熾烈な競争を勝ち抜いていくであろうとの期待感を大いに抱かせる。しかしながら、今後の展開については決して楽観視することはできず、例えば理論グループとの連携は特に必要不可欠であろうと思われる。

2-4. 理論グループ

このグループは、上田総括（グループリーダーを兼務）のバックグラウンドでもあり、これまでの「助走」を活かせるグループでもあった。上記実験 3 グループとは独立して、「スピノール・ボース凝縮体による Knot 生成」や「 ${}^{52}\text{Cr}$ ボース凝縮体の d 波的崩壊過程」などの独創的で非常に優れた成果を出し、国内外からも高く評価されている。今後においても、冷却原子の理論研究を先導することが期待される。

また一方で、プロジェクト内の実験グループとの共同研究も着実に進んでいると見受けられる。相互作用制御グループとの連携では、 ${}^{41}\text{K}$ - ${}^{87}\text{Rb}$ フェッシュバツハ分子の生成における今後の実験戦術にとって不可欠な指針を打ち出すことに成功しており、また強相関量子制御グループとの連携では、「BEC-BCS クロスオーバー」で見出された、転移温度のプラト-的振る舞いについて、それを説明する理論を導き出そうとしている。欧米の著名な冷却原子の実験グループの近くには必ず優秀な理論グループが存在し、緊密な協力関係が結ばれている。本 ERATO プロジェクトでもこれを倣い、今後さらに実験と理論の協力が進み、独創的な研究が展開されることを期待している。

以上ここまで、ERATO プロジェクトを構成する 3 つの実験グループおよび 1 つ

の理論グループの研究成果の現状および今後の見込について言及してきた。ERATOのリソースが十分に活用されることによって、実験システムのセットアップがわずか3年で完了したのみならず、既に世界の先行グループに比肩する研究レベルにある。またこの段階で世界の研究者にインパクトをもたらす研究成果が得られていること、および今後の期間における研究計画も極めて綿密に多角的に立てられており、質の高い成果が得られることが十分に期待できる。しかしながら、強相関量子制御グループと理論グループを除いて、論文発表は十分に行われていない。これは、プロジェクト期間前半では、研究成果公表よりも研究そのものの遂行を重視する、という研究総括の方針に依るところが大きく、実際この方針が、成果の創出に功を奏したのも事実であろう。しかし後半の活動では、質量ともに十分な論文発表を行っていくことが強く望まれるであろう。

〔研究成果の現状と今後の見込〕

a+ (成果として秀逸であり、今後にもさらに期待できる)

3. 総合所見

以上ここまで、プロジェクトの運営や研究成果の現状、およびそれらの今後の見込について、評価委員としての所見を述べてきた。再三述べてきたように、本来はBECの理論研究者であった上田総括が、自身の仮説やアイデアを実験的に明らかにすることを目指し、優秀な若手研究者を一点に招聘・集約することにより、レベルの高い研究が自律的に進展する拠点を創出することに成功している。本ERATOプロジェクトから出てくる成果は常に世界的注目を集め、それはプロジェクトが中間評価を迎えるこの時点において、既に世界的に見ても卓越した研究水準にあることを指し示している、何よりの証拠であるといえる。当然、世界のスピードはなお一層増してくると思われるので、この卓越した水準を維持するどころか、さらに「高み」および「深み」を増すために、総括はじめ構成員の弛まぬ努力・成果の発信に期待するところである。

BECは、量子システムの見本として注目されるだけでなく、物理学のいくつかの主要な領域、つまり原子物理や物性物理（多体系の物理）、量子光学や量子化学、量子情報が結びついた、非常にユニークな分野を産み出している。それはしかしながら、単に既存分野を学際的にまとめ上げ、「イノベーションのもととなる技術シーズを創出する」ことに留まらず、各々の分野を支配する基本原則の理解にも直接フィードバックされていく。これからのインパクトを推し量りつつ、上田総括のプロジェクト運営にも大きな期待を寄せたい。

〔総合評価〕

A+ (卓越した研究水準にある)

以上