

## ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト事後評価報告書

【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 (委員長；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

本プロジェクトでは、絶対零度近くにレーザー冷却された原子集団や人工分子等の「大自由度 (マクロ) 量子系」において、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、マクロ量子系の物理的現象を系統的に探究するとともに、主として将来の強相関係物質科学や量子情報科学などに資する、新たな切り口を見出す取組みが進められた。

プロジェクトの運営においては、本来は理論研究者である上田総括が実験グループを束ね、指揮するスタイルが採られた。発足当時は 30 代前半であった若手研究者 (井上・上妻・向山) を実験グループのリーダーとして抜擢し、東京大学内のオープンスペースに、精緻な計測装置を短期間のうちに整備した。その結果として、発足から約 3 年が経過した 2008 年 11 月の中間評価の時点で、既に世界トップの研究拠点と比肩する、卓越した研究水準に至っていたことは特筆すべきことである。

このような研究体制のもとで得られた研究成果は、科学・技術的側面において秀逸なものであると認められる。例えば、中間評価時までの成果である、 $p$  波フェッシュバハ共鳴を用いた  ${}^6\text{Li}_2 \cdot p$  波分子の生成は、新しい  $p$  波超流動の実現へ向けた重要な第一歩であり、今後、極めて重要な新奇量子凝縮相を与えることが期待できる。またその後本事後評価までにも、極低温  ${}^6\text{Li}$  気体の普遍的な熱力学関数の決定、単一核スピン状態のトモグラフィ観測、振動・回転基底状態の極低温分子 ( ${}^{41}\text{K}$ - ${}^{87}\text{Rb}$ ) の実現などの研究成果を上げた。なお研究成果の公表という点では、中間評価の際に、実験グループの論文公表が十分でないことを指摘したが、その後、上記成果が *Science* 誌や *Physical Review Letters* 誌等に掲載されたり、国内及び国際会議での招待講演を受けたりするなどの状況に転じたことは、本プロジェクトのプレゼンスを世界的にかつ顕在的に示す結果となった。

また ERATO での研究活動を通じて、プロジェクトに参画した全ての若手研究員は、単に優れた研究成果を上げたということのみならず、先端的計測技術等を身につけたという点で、大学や独法研究機関等に次なるポジションを獲得しており、人材育成という面でも、重要な貢献が認められることを強調しておきたい。

これらを踏まえ、本プロジェクトは、中間評価時に引き続き卓越した研究水準であったと認められ、戦略目標「光の究極的及び局所的制御とその応用」に資する十分な成果が得られたと認められる。

## 1. 研究プロジェクトの設定および運営

### 1-1. プロジェクトの全体構想

近年の量子論の進展は、その基礎的物理学を理解しようとするだけでなく、量子計算・量子暗号等を活用したデバイスの創製への展開等へと波及している。これに呼応した現在の研究のメインストリームは、「単一量子の極限操作」—具体的には、単一電子・磁束量子操作（量子ドットや超伝導キュービットなど）や単一光子操作（微小共振器や微小球、フォトニック結晶など）など—が挙げられ、国内外、アカデミック・産業界問わず、多くの研究が進められる状況にある。

一方、「ERATO 上田マクロ量子制御プロジェクト」の主要な研究ツールは、「冷却原子気体」と呼ばれる、レーザー冷却により数百ナノケルビンの極低温に冷却された原子集団である。この「冷却原子気体」系では、単一量子系（マイクロ量子物質）の有する高い制御性はマクロなスケールに拡大するため、系の性質を決定するほとんど全てのパラメータを連続的に変化させることが可能になり、「マクロ量子系」における新たな現象探索への期待が膨らむ。

こうした考えを背景に、本プロジェクトでは、戦略目標「光の究極的及び局所的制御とその応用」のもと、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観測・制御する方法の確立をプロジェクトの全体構想の要に据えた。そしてこの確立によって、新たな現象探索はもとより、「光による物質パラメータの究極的制御」という観点での物質科学（特に強相関係）との接点、新しい量子情報科学の基盤技術の創出等を視野に入れ、独創性のあるチャレンジングな研究課題を設定した（プロジェクト発足は、2005年9月）。

### 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

研究総括を務めた上田正仁・東京大学大学院理学系研究科教授（発足当時は、東京工業大学大学院理工学研究科教授）は、それまでボース・アインシュタイン凝縮（Bose-Einstein Condensation ; BEC）等の理論研究者として著名であった。その意味で本プロジェクトは、「理論研究者が実験グループを組織し牽引する」という特徴的な運営形態を採った。ここで重要となるのが、実験グループの実務を誰が担うのかという「人事戦略」であったといえる。その意味でも本プロジェクトが特徴的であったのは、発足当時は 30 代前半であった若手研究者（井上慎・上妻幹旺・向山敬）をそれぞれ実験 3 グループのリーダーとして抜擢したことである。

研究実施場所は、東京大学工学部 9 号館に約 330m<sup>2</sup>確保・集約された。各実験グループが個別に実験を進めていくのではなく、グループ間での技術供与や研究連携など、有形無形のシナジー効果を意図した上田総括の運営スタイルが反映されたと見受けられる。また、既に中間評価（2008年11月実施）の際にも述べたように、発足からわずか 3 年の間に、全くゼロの状態から、世界の名だたる研究拠点に比肩するレーザー・光学・検出システムが、十二分に稼働する状態までに至った。このことは、本プロジェクトの研究活動の高さを物語る事実であると我々は評価したが、その背景には、上記した若手グループリーダーの抜擢とシナジー効果が成功していることも見逃せない。

さて、同時に我々評価委員は、本プロジェクトの研究活動の高さをより顕在的に示すためにも、「目に見える成果」を創出することを強く提言した。研究成果の詳細は次節で述べるとして、ここでは結論のみを述べると、それは十分にクリアしたものと認められる。すなわち、質量ともに秀逸な成果の発表が、学術論文や国際会議等で公表され、プロジェクトとしてのプレゼンスが世界的に示されたと認められる。

以上、1-1. および1-2. を踏まえて、本プロジェクトの設定および運営等に対し、我々評価委員としての所見を改めて整理する。

本プロジェクトは、マクロ量子系の量子状態を最先端のレーザー光技術等を駆使して高精度に制御・観測することによって、新たな量子現象の探索を行うための独創的かつ挑戦的な研究課題に取り組んだ。また期待される研究成果が、冷却原子研究における新たなパラダイムを切り拓くだけでなく、物質科学、量子光学、量子情報処理といった分野へのインパクトを及ぼすであろうと見込まれる点においても、ERATO の枠組みを活かすに相応しい、特に優れて的確な設定であったと認められる。

プロジェクト運営にあたっては、理論研究者である上田総括が、実験グループを束ねるという形態が採られた一方、有能な若手研究者のグループリーダーへの抜擢などを効果的に活かし、発足からわずか3年の間に世界最高水準の精緻な研究システムが整備された。なお勿論のことであるが、このシステム整備においては、上記グループリーダーのみならず、個々のプロジェクト構成員の寄与があったであろうことは、想像するに難くない。また、これら実験3グループと、上田総括の兼務する理論グループとは、各々がグループ間連携を意識し、協調してレベルの高い研究成果が生み出されたと認められる（詳細は次節）。これには、研究実施場所を「集中研方式」にしたというメリットもあったであろう。

研究成果の公表という点では、中間評価の際に、実験グループの論文公表が十分でないことを指摘したが、その後は好転し、本プロジェクトのプレゼンスを顕示したことは上述の通りである。また、プロジェクトに参画した全ての若手研究員が、単に優れた研究成果を上げたということのみならず、先端的計測技術等を身につけたという点で、大学や独法研究機関等に次なるポジションを獲得している事実を取っても、本プロジェクトの研究活動は特筆して高かったことを物語っていると認められる。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a+ （特に優れて的確かつ効果的であった）

〔研究活動の状況〕 a+ （特筆して望ましい研究活動・展開を示した）

## 2. 研究成果

### 2-1. 相互作用制御グループ（グループリーダー：井上 慎）

本グループは、極低温の極性分子を生成し、従来の冷却原子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、そこで発現する新奇な現象の探索を大きな目標とする研究を進めた。一般に、分子は並進・回転・振動の自由度を持っており、分子を直接的

に冷却することは極めて困難であるとみなされている。そこで本グループでは、海外の先行研究グループと同じく、「冷却原子どうしをつなぐ（間接法）」ことによりこの課題にチャレンジした。

中間評価の際にも言及したように、本グループとしての独自性は、「用いる原子種（同位体）の選択」、および「極性分子の生成のフェッシュバハ共鳴による制御」であった。研究対象系として  $^{41}\text{K}$ - $^{87}\text{Rb}$  の組み合わせを選択し、 $^{41}\text{K}$  の単独 BEC や、 $^{41}\text{K}$  および  $^{87}\text{Rb}$  の同時 BEC を達成するなどの業績を上げるまでに至っており、システムのセットアップも含めた 3 年間で、先行研究グループの水準に肉薄するレベルに到達していた。

その後の展開としてまず、Spontaneous-decay Induced Double Resonance (SpIDR) 法と命名された独自に開発した分光法により、光会合により緩く束縛された分子の原子間ポテンシャルを正確に測定することを可能にした。さらにその測定結果を利用して、誘導ラマン断熱遷移 (Stimulated Raman Adiabatic Passage: STIRAP) 法で振動・回転基底状態にある  $^{41}\text{K}$ - $^{87}\text{Rb}$  の生成に成功した。分子の生成効率も非常に高く、本グループの成果により極低温の極性分子を用いた新奇現象探索へ向けて大きな一步を踏み出した成果として、特筆して高く評価されるべきである。また、本成果の Physical Review Letters への掲載決定も含め、中間評価の際に我々評価委員から提言した「論文等への成果公表」の課題は、本事後評価までの間に十分にクリアされたと認められる。

さて、研究の進捗や成果以外にも高く評価したいのが、これまでの問題解決に向けた研究の取り組み方である。グループの各構成員の努力はいうに及ばないが、他実験グループからの技術供与を積極的に受けるとともに、グループで取得された実験データを基に理論グループが分子のエネルギー準位を計算し、それを指針に実験を進められた。プロジェクトが一つの拠点に集約する利点を活かし、その中で理想的な分業・協調をとりつつ、非常に困難でチャレンジングな課題に取り組んだと認められる。

今後、振動・回転基底状態にある極低温分子の並進運動の制御や、光格子への分子の閉じこめなどが可能になれば、極低温分子どうしの相互作用制御の実現性が高まり、極低温化学反応や量子情報処理への展開にも期待することができる。当然さまざまなクリアすべき課題があるが、これまでの 5 年間の取り組みは、その克服を可能とするだけのものはあるといえる。

## 2-2. 不確定性制御グループ（グループリーダー：上妻 幹旺）

量子系に対する非ユニタリー過程（測定が関与する過程）は、量子力学の根幹に関わる古くて新しい問題であり、未解明の部分が数多く残されている。また近年注目されている量子暗号などでは、観測によって生じる擾乱を利用して通信の盗聴を不可能にするなど、「観測問題」は、量子力学を応用した将来技術にとっても不可欠の要素となっている。本グループでは、非ユニタリーな観測過程で生じる量子力学的不確定性を制御し、その技術を冷却原子気体による物性研究、超精密測定、さらには量子情報処理へと発展させるという大きな目標を持つ。

既に中間評価の際にも述べたように、本グループでは、研究対象系に特徴を出した。すなわち、欧米の先行グループのようなアルカリ原子系ではなく、 $^{171}\text{Yb}$  原子を選択した。 $^{171}\text{Yb}$  は、残留磁場の影響を受けやすい電子スピンの完全に消失している上に、磁場擾乱を受けに

くい核スピンについては、その値がキュービットの基本単位と同じ  $1/2$  となる特徴がある。前節でも述べたように、本グループでも中間評価までの時点で、技術的問題（波長 399nm の紫外領域での計測ミラーの経時劣化等）をクリアしつつ、波長 566nm の異重項間遷移に対する微小共振器系のシステムセットアップを完了し、単一  $^{171}\text{Yb}$  原子の実時間観測とそのファラデー回転の観測といった、質の高い成果を上げるまでに至っていた。

その後事後評価までの間には、ファラデー回転の観測の S/N 向上によって大きなファラデー回転角の観測に成功し、弱測定から射影測定までの制御を可能にした。なおこの実験結果においては、理論グループの解析によって説明可能であることが示され、プロジェクト内での連携が機能した好例の一つといえる。

また、 $^{171}\text{Yb}$  の単一核スピンに対する 100%近い高いビジビリティを持つラビ振動の観測や、さらにはその量子トモグラフィ測定にも成功するなどの、特筆して高く評価できる成果を上げた。なお、相互作用制御グループと同様、中間評価の際に我々評価委員から提言した「論文等への成果公表」の課題は、本事後評価までの間に十分にクリアしたと認められる。

今後これらの成果は、複数原子間のエンタングルメントの観測及びその制御、さらにはクラスター状態作成などの量子情報処理への基盤技術としての展開に期待が及ぶ。量子コンピュータが、従来の計算機からのアドバンテージを打ち出すためにも、100 キュービット・オーダーの集積化、及びデコヒーレンスの問題をクリアできれば、関連分野に多大なブレークスルーをもたらすことが期待できる。

### 2-3. 強相関量子制御グループ（グループリーダー：向山 敬）

本グループは、固体物理における本質的問題（相互作用の強さが物性に与える影響など）を人工量子物質により解明するとともに、さらなる新しい現象を探索することを大きな目標として掲げた。量子相関が系の状態に強く影響を与える系（強相関系）の物理を、光トラップ中の極低温フェルミ同位体原子（ $^6\text{Li}$  など）の熱力学的性質を詳細に調べることで明らかにすべく、さまざまなチャレンジングな研究テーマを設定した。

中間評価の際にも述べたように、本グループは、プロジェクト発足後 1 年で  $^6\text{Li}$  原子気体のフェルミ縮退や  $^6\text{Li}_2$  分子の BEC、そして p 波フェッシュェバツハ共鳴を用いた  $^6\text{Li}$  の p 波分子の生成及びその挙動の詳細な解析に成功するなどの卓越した成果を上げるとともに、学術論文誌での公表を進めるなどの非常に好ましい進捗状況を示していた。特に、p 波分子の生成に関する成果から今後期待されることは、「相互作用可変な p 波超流動の実現」である。p 波超流動として現在唯一知られている  $^3\text{He}$  と異なり、原子間相互作用が BCS 領域から BEC 領域まで自在に変化させることができるため、p 波超流動の新奇な量子凝縮相を見出すことが期待でき、非常に大きなインパクトをもたらすことが期待できる。

本プロジェクトの卓越した成果の中でも特に評価できるのが、本グループから事後評価までに発表された「ユニタリーフェルミ気体の普遍的熱力学関数の決定」である（*Science* 誌に掲載）。極低温  $^6\text{Li}$  原子気体を用いて、ユニタリー極限状態と呼ばれる、相互作用が極限まで大きくなった原子集団の普遍的性質の熱力学関数を実験的に決定した。素粒子から宇宙に至る幅広い範囲で見られるユニタリー極限の熱力学的性質を理解する上で、最も基本的な情報を提供する成果として、注目することができる。

また、発足当初には予期しなかった、フェルミ粒子の特異な 3 体束縛状態（エフィモフ

状態)の直接的観測にも高い評価を与えたい。中間評価の際の、本グループへの我々評価委員の提言として、理論グループとの連携を挙げたが、本成果獲得の過程においては、その連携が功を奏したと認められる。non-universal 補正を考慮した新しい理論モデルが実験データの定量的説明を可能とし、また RF 会合に基づくエフィモフ状態の詳細な分光実験のデータが理論パラメータの決定に役立つといったように、実験と理論が相補的に進展し成果が得られた。

#### 2-4. 理論グループ (グループリーダー: 上田 正仁)

本グループは、上田総括がグループリーダーを兼務し、実験 3 グループをサポートする理論研究の展開、具体的には、実験の戦略に関するアイデアの提案や実験結果の解析を行う一方で、理論研究独自の観点での研究にも取り組んだ。特に後者に関しては、既に中間評価の際にも述べたように、 $^{52}\text{Cr}$  の双極子 BEC における d 波崩壊過程の理論的解明などの業績を上げていた (シュツットガルト大学の実験チームとの共同研究成果)。

中間評価以降は、上記実験 3 グループとの連携をさらに深め、成果として明示的に現れるようになったと認められる。既に各グループの中で述べたように、得られた実験結果の理論的解析のみならず、例えば相互作用制御グループのように、実験指針となる理論データの提示なども行われた。欧米の著名な研究機関で実践されているような、実験と理論の緊密な協力体制が構築され、高く評価することができる。

また、理論グループ独自の成果としても、中間評価以降に「3 成分  $^6\text{Li}$  原子気体のエフィモフ状態の可能性」や「多成分量子気体における散乱長の独立制御」などのプロジェクト内の実験に即した優れた成果が得られていると認められる。

以上、各グループでの研究成果の状況などを踏まえ、我々評価委員としての所見を改めて整理する。

各グループが大きな研究目標とその実現に資する挑戦的なテーマを設定しつつ、前節でも述べたように測定システムのセットアップを短期間のうちに完了させ、既に中間評価の時点で、p 波フェッシュバッハ共鳴を用いた  $^6\text{Li}_2 \cdot \text{p}$  波分子の生成をはじめとした成果のもと、既に世界の先行研究グループと比肩する高いレベルとして認知されるような、質の高い研究成果を上げていたと認められる。さらに中間評価以降も、極低温  $^6\text{Li}$  気体の普遍的な熱力学関数の決定、単一核スピン状態のトモグラフィ観測、振動・回転基底状態の極低温分子 ( $^{41}\text{K}$ - $^{87}\text{Rb}$ ) の実現などの卓越した研究成果を上げ、その内容は、冷却原子の研究分野に留まらず、物質科学や量子情報、量子光学など他分野へ大きなインパクトを与えうるものである。また再三述べるように、中間評価以降は、学術論文への掲載をはじめとして、研究成果の質のみならず量にも努力が図られたと認められる。以上の点を総合すれば、科学技術的側面での研究成果は秀逸なものであると認められる。

また、上記のような「マクロ量子系」における新たな現象探索を主眼とした本プロジェクトの研究成果は、すぐに産業や社会に直結するものではない。しかしながら、例えば不確定性制御グループの研究成果などは、原子や光子の量子状態を用いた超精密計測法や、さらには光格子時計などの超高精度の原子時計への展開の可能性も有している。従って、中長期的な視野に立つての技術シーズは、この 5 年間で撒かれたと認められ、産業社会的側面での

研究成果は良好なものであると判断した。

〔研究成果（科学技術的側面）〕 a+（成果として秀逸である）

〔研究成果（産業社会的側面）〕 a（成果として良好である）

### 3. 総合所見

本プロジェクトでは、本来は理論研究者であった上田総括が実験グループを統括するという運営スタイルが貫かれ、研究実施場所の確保や研究者の結集など、まさに何もない状態からのスタートであった。「マクロ量子系」における新たな現象探索というプロジェクトの目指すターゲットに対し、チャレンジングな課題設定とそれを実行する人材の結集など、上田総括の運営哲学に加え、若手グループリーダーひいては全構成員のひたむきの努力と強い使命感により、世界の主要な **AMO (Atomic, Molecular and Optical) physics** 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認められる。

得られた研究成果は、冷却原子の研究分野に留まらず、物質科学や量子情報、量子光学など他分野へ大きなインパクトを与えうる秀逸なものであると認められる。成果獲得に際しては、理論グループが各実験グループの結果をサポートするといった事例が随所に見受けられ、本プロジェクトの運営スタイルが極めて効果的であったことを示唆するものである。また、これらの成果を得た全ての若手研究員は、その業績や身につけた先端的計測技術等をもとに、大学や独法研究機関等に次なるポジションを獲得している。

以上、研究体制およびその運営、研究成果、さらには人材育成の観点などから、本プロジェクトは、中間評価時に引き続き卓越した研究水準であったと認められ、戦略目標「光の究極的及び局所的制御とその応用」に資する十分な成果が得られたと認められる。

〔総合評価〕 A+（戦略目標に資する十分な成果が得られた）

以上