

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)：

研究代表者

百瀬 孝昌 (情報通信研究機構電磁波計測研究センター 客員研究員／ブリティッシュコロンビア大学 教授)

主たる共同研究者

金森 英人 (東京工業大学大学院理工学研究科 准教授)

大森 賢治 (自然科学研究機構分子科学研究所電子構造研究系 教授)

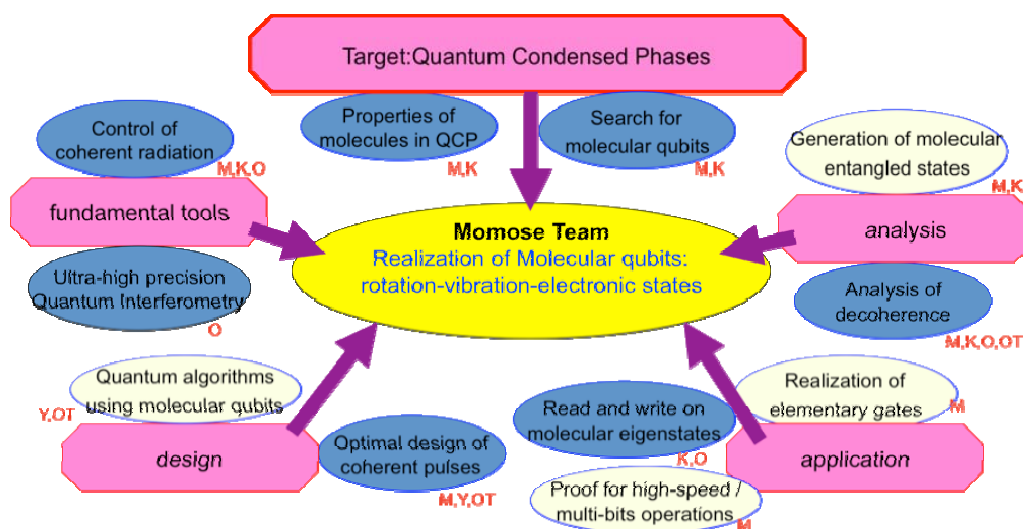
山下 晃一 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

大槻 幸義 (東北大学大学院理学研究科 准教授)

3. 研究実施概要

本プロジェクトでは、分子固有の電子および振動回転の内部自由度を活用した新しい量子情報処理技術の提案とその基盤技術の開発を世界に先駆けて行なうために、百瀬(京大・東工大・情報通信研究機構・ブリティッシュコロンビア大学)、金森(東工大)、大森(分子科学研究所)の実験3グループと、山下(東大)、大槻(東北大)の理論2グループが共同して研究に取り組んだ。分子には 10^{-3} 秒から 10^4 秒と極めて長い自然寿命を持つ振動・回転の固有状態が多数存在することから、分子の電子および振動回転の内部自由度を量子情報処理技術の資源として活用することで、原子系のような2準位系では実現不可能な多ビット論理演算をはじめとする様々な量子情報処理の可能性が広がると期待される。このような提案は以前からあるが、具体的に実験的に取り組んだ例は世界的に見ても(本プロジェクト発足時には)ほとんどなく、他の手法に比べて、その開発がきわめて遅れている状況であった。その最大の理由は、分子の内部状態を制御するために必要不可欠な周囲との相互作用を抑制した環境下での分子の空間捕捉が未だ実現されていないことにある。

本研究チームは、固体パラ水素という量子凝縮相に単離捕捉した分子が、極低温の環境に空間捕捉され、かつ周囲との相互作用がほとんどなく、励起状態の緩和時間が一般の凝縮相より3桁以上長い、という希有な特徴を持つ事を活用することで、分子を量子演算素子として用いる時に障害となっている空間捕捉及び冷却の問題を回避でき、分子の内部量子状態を用いた新しい量子情報処理基盤技術を世界に先駆けて確立することができると考えた。そこで量子凝縮相中に捕捉した分子の電子・振動・回転状態の量子もつれ状態の生成やデコヒーレンス等に関する実験およびその理論的解析をプロジェクトとして遂行した。そのために、緻密に位相制御された高輝度のコヒーレント光源およびアト秒精度で制御された超短パルス光源など固有状態間の重ね合わせ状態を制御する実験技術を開発するとともに、分子固有の新しい量子情報処理基盤技術の確立に向けた理論解析を行った。本プロジェクトが既存の他のプロジェクトと大きく異なる点は、量子情報処理を実現するために必要な、対象とする系の探索(target)、基礎実験技術(fundamental tools)、理論解析(design & analysis)、応用(application)等すべての点において、活用できる資産がさほど多くはない(研究への取り組みが世界的に大幅に遅れている)という点である。そのため、これまで、量子凝縮相の分光、量子光学、量子計算(シミュレーション)の各分野で世界的な研究を行ってきた5グループが共同して本プロジェクトに取り組んだ。以下の図は、チームとしての取り組みの概念図と、5グループのそれぞれの役割を示す。赤枠で示した5つが研究の大枠、青枠がさらにこまかい取り組みである。こまかい取り組みのうち青地で示したものは、過去5年間でチームとしての成果の上がった項目であり、それぞれの枠の右下の赤字アルファベットが成果を上げているグループ名 (M:百瀬、K:金森、O:大森、Y:山下、OT:大槻) を示す。黄地は現在挑戦中の課題である。



4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

本プロジェクトは、固体パラ水素などの量子凝縮相に個別に捕捉された分子が、極低温の環境下で安定に空間捕捉され、環境との相互作用がほとんどなく、長いデコヒーレンス時間が期待できることに着目し、このような分子の電子・振動・回転状態を用いた量子情報処理技術の開発を目指したものである。本プロジェクトが開始される以前には、分子を用いた量子情報処理やエンタングルメント生成といった研究動向はほとんどなく、この独創的な研究を遂行し、その成果を44件の欧文誌論文、69件の国際会議招待講演として世界へ発信してきた結果、分子の内部自由状態を用いることの重要性が国際的にも広められた意義は大きい。

分子の量子ビットとしての性能評価や要素技術の開発(精密に位相制御された高輝度のコヒーレント光源の開発、アト秒精度で制御された極短パルス光源など)という研究開発の目標は達成されている。また、コヒーレント光パルスの量子最適制御アルゴリズムやデコヒーレンス機構の解明など理論面でも成果があった。

しかし、固体パラ水素に捕捉された分子では、1K以下に冷却してもデコヒーレンス時間が長くない、といった想定外の展開も見られた。また、射影測定に課題が残されており、実際の量子ゲート動作の実証には至っていない。

研究代表者がプロジェクト開始当初に、京大からプリティッシュコロンビア大(カナダ)へ異動があったが、研究代表者のリーダーシップは十分に発揮され、研究チーム間の共同研究も活発に行なわれた。特に、分子のコヒーレンス制御、検出、量子アルゴリズムの実装、など広い視野から研究対象を評価しようとする適切な体制が取られていた。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

世界的にあまり研究の進んでいない分子を量子情報処理へ応用しようとする挑戦的な研究であり、その概念と基礎技術、理論ツールを世界に認知させたという点で高く評価される。開発された光源技術、コヒーレント制御法などは、広く分子物理学の基礎研究へインパクトを持つものと期待される。本プロジェクトから4回にわたる受賞があったことにも、その事実が現われている。

一方、本プロジェクトの中心的概念(量子凝縮相へ捕捉された分子量子ビット)の限界も明らかになり、分子の光格子へのトラップ、など新しい方向を開拓しなければ、この分野を量子情報処理の表舞台へ引き上げることはできない。

4-3. 総合的評価

本プロジェクトは、分子の電子・振動・回転状態を用いて量子情報処理を行なおうとする挑戦的な研究であり、

分子量子ビットの性能評価と制御技術の開発、量子最適制御シミュレーションの確立といったプロジェクトの目標は達成された。ただ、量子情報処理ツールとしての課題も明らかになり、将来性の判定にはまだ時間がかかる。一方、本プロジェクトで開発された実験技術、理論ツールには、広い分野で将来の発展が予想され、今後の研究に期待したい。