

パリティ非保存測定を目指した冷却カイラル分子の超高精度偏光分光

Ultra-high precision circular dichroism spectroscopy of cold chiral molecules toward the observation of parity violation

所属機関： 岡山大学 代表研究者氏名：宮本 祐樹

研究期間： 2024 年 4 月 1 日～ 2025 年 3 月 31 日

区分：グループ

研究分担者：

氏名	所属機関	研究活動期間	役割
榎本勝成	富山大学	2024 年 12 月 10 日～2024 年 12 月 20 日	減速器開発
久間晋	理化学研究所	2025 年 3 月 16 日～2025 年 3 月 23 日	分子源開発
岩國加奈	電気通信大学	2024 年 3 月 18 日～2024 年 3 月 30 日	光周波数コム開発
大類誠也	東京都立大学	2024 年 3 月 16 日～2024 年 3 月 29 日	分子源開発

滞在研究機関： Department of Chemistry, The University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada V6T 1Z1

共同研究者等： Prof. Takamasa Momose

This research focuses on utilizing cooled chiral molecules as probes for detecting parity symmetry violation, aiming to develop ultra-high precision polarization spectroscopy techniques. In 2024, three main topics were addressed: 1) the development of a circular dichroism dual-comb spectroscopy device for high-precision spectroscopic detection of chiral molecules, 2) research on molecular beam deceleration using Zeeman and Stark decelerators, and 3) spectroscopic studies of chiral dimers using helium nanodroplets. Achievements include successful dual-comb spectroscopy development, molecular deceleration simulations, and fluorescence measurements of amino acid isomers in helium droplets. Future work will focus on refining the spectroscopy system and enhancing fluorescence signal sensitivity.

海外研究活動概要

冷却分子は新たな量子デバイスの素子として世界的に注目されている。本課題では、冷却カイラル分子をプローブとしてパリティ対称性の破れを検出することを究極の目標とし、その実現手段として、冷却カイラル分子の超高精度偏光分光法の確立を目指した。そのため、多原子分子冷却研究のパイオニアの一人であるブリティッシュコロンビア大学の百瀬教授との共同研究を行った。

2024 年度には、主に以下の三つのトピックに着目し、それぞれ研究者を海外に派遣した。

①カイラル分子の高精度分光を実現するための円二色性 (circular dichroism, CD) デュアルコム分光装置の開発。CD 分光は、カイラル分子の吸収における偏光依存性を測定する手法であり、分子のキラリティ

検出に用いられる。一方、デュアルコム分光は光周波数コムを光源とする分光法で、広帯域かつ高分解能のスペクトル取得が可能である。これらを組み合わせることで、遷移周波数が未知のキララル分子の高感度検出が期待される。派遣期間中には、キララル分子であるボルネオール (Borneol) の CD 分光に向けた近赤外光周波数コムの開発に取り組んだ (電通大・岩國)。

②ゼーマン減速器およびシュタルク減速器による分子線減速器に関する研究。これらの装置は、分子線のうち一部 (パケット) に対し、その飛行と同期させたタイミングで磁場や電場をスイッチングし、分子と電磁場との相互作用により減速を行うものである。シュタルク減速器の先には超伝導マイクロ波共振器が設置されており、高強度のマイクロ波定在波

を用いることで、分子パケットのさらなる減速および捕捉が可能となる。今回の滞在では、学生・ポストドクへの助言、実験支援、分子パケットの運動制御に関するシミュレーション等を行った（富山大・榎本）。

③ヘリウムナノ液滴を用いたカイラル二量体の分光研究。単一または異なる光学異性体からなる二量体では、分子間相互作用の違いにより構造およびエネルギーに差異が生じる可能性があり、これは生命体における光学異性体の識別機構（キラル認識）に対応する。滞在中に、ヘリウム液滴中に取り込まれたアミノ酸光学異性体分子の蛍光測定実験を実施した（理化学研究所・久間、都立大・大類）。

成果

①2台のファイバーコムを光源とし、これを基準信号に安定化することでデュアルコム分光計を構築した。基準信号としては、CW レーザーおよび RF 信号を用い、それぞれ光周波数コムの繰り返し周波数 (f_{rep}) とオフセット周波数 (f_{ceo}) を安定化させた。 f_{ceo} の安定化には、制御を施さない状態での線幅が十分に狭いことが要求され、その線幅はレーザー共振器のノイズやパルス発振状態に依存する。そこで、滞在中にレーザー共振器の構成を見直し、分散調整などにより、非制御時でも f_{ceo} 線幅が 100 kHz 以下となる狭線幅を実現し、これを PID 制御によって RF 基準信号に安定化させた。次に、CW レーザーとの干渉により、波長 1.5 μm の DFB レーザーとコムの間で制御可能な 30 dB (RBW 300 kHz) のビート信号を検出した。さらに、Borneol 分子を含む将来的な多種分子の CD 分光に向けて、高非線形ファイバーによるスペクトルの広帯域化を行い、少なくとも 1.1 ~ 1.7 μm にわたる広帯域スペクトルが得られることを確認した。

②シュタルク減速およびマイクロ波による減速・捕捉に関しては、主に装置の不具合対応に終始したものの、主な成果としては、ゼーマン減速後におけるゼーマンガイドによる分子パケットの飛行シミュレーションが挙げられる。六重極配置の永久磁石を約 30 組、傾けながら配置することで、磁気モーメント

の大きな分子をガイドし、直進する他の分子と空間的に分離することが可能である。有限要素法により磁場の詳細な数値データを取得し、それを解析的関数で展開することにより磁場を高速で再現し、分子パケットの軌道を効率よく計算可能とした。

③低温ノズルからのビームとして液滴を真空中で生成した。UBC が独自に開発したソレノイド型低温パルスバルブを用いて、ノズル温度 12 K、圧力 2 MPa という条件で液滴を生成し、平均原子数 $N=10^4$ の液滴が形成されたと推定される。加えて、連続ノズルを用いた液滴生成実験も実施し、ビームの安定性を比較した。蛍光測定では、加熱セルからのアミノ酸分子（チロシン）を液滴内に捕捉し、紫外光によって電子励起を行った。励起後に有限の寿命で放出される蛍光を積算することで、期待される波長付近にピークを持つ励起スペクトルを得た。

今後の展望

①今後は、 f_{rep} および f_{ceo} の同時制御を実現し、デュアルコム分光計の光学系を完成させるとともに、データ取得・干渉信号からのスペクトル変換などの信号処理系の構築を進める。その後、波長 1.4 μm 付近に遷移が存在すると予測される Borneol 分子の CD 分光を行う予定である。

②分子各状態のエネルギー測定精度は、最終的には量子力学の不確定性原理によって制限され、測定系との相互作用時間に反比例する。分子の減速・捕捉は、この相互作用時間を飛躍的に延ばすことができ、超高精度分光における極めて重要な要素である。今後もマイクロ波減速器の開発を継続し、共同研究体制の強化を図る。

③ヘリウム液滴実験においては、加熱セルの条件最適化により液滴内のアミノ酸分子数を精密に制御し、単量体に加えて二量体の生成を目指す。さらに、蛍光収率の高いアミノ酸であるトリプトファンを用いることで、蛍光信号の強度向上を図る。

研究の発表

口頭発表：なし 誌上発表：なし