

有機薄膜表面のレーザー冷却原子 ～スピン物理の新たなプラットフォーム

所属： 東京農工大学 大学院工学研究院 先端物理工学部門

助成対象者： 畠山 温

概要

パラフィン表面に吸着したアルカリ金属原子のスピン量子状態が、マイクロ秒をはるかに超えて維持されることを示唆する実験結果があり、スピンを用いる量子技術研究での応用が期待される。本研究では、パラフィン表面に入射したアルカリ金属原子の挙動を詳細に観測するために、運動が高度に制御されたレーザー冷却原子を原子泉技術でパラフィンに入射し相互作用させ分光するための実験システムを開発した。並行して、パラフィンに入射したアルカリ金属原子の散乱・吸着過程を理論面からも明らかにするため、分子動力学法による数値シミュレーションを行った。表面長期滞在成分の割合の温度依存性など、今後、上記開発装置を使った実験で検証すべき結果を得た。

abstract

Some experimental results suggest that alkali-metal atoms adsorbed on a paraffin surface preserve their quantum spin states over microseconds, indicating possible applications of this system in the research field of quantum technology based on spins. In this research, we developed an apparatus for precision spectroscopy of laser-cooled atoms that are incident to a paraffin surface by a laser fountain technique. We also performed molecular dynamics simulations to understand scattering and adsorbing processes on the paraffin surface. The calculated temperature dependence of the long-dwelling atom component should be experimentally verified.

研究内容

[背景]

パラフィン表面に入射したアルカリ金属原子はスピン状態を維持したまま散乱されることが知られているが、最近の申請者の研究で、一部の原子はマイクロ秒より遥かに長い時間、表面に滞在していることが示唆されている [1]。この長期滞在原子は、スピン状態を維持したまま空間的に局在化しているため、量子情報処理研究など新しいスピン物理のプラットフォームとして期待ができる。従ってこの長期滞在原子をはじめ、パラフィン表面に入射したアルカリ金属原子の挙動をよく理解することが必要である。

[目的]

申請者は本研究において、入射原子にレーザー冷却原子を使い、レーザー冷却原子気体を有機薄膜表面上で精密分光することでその状態を詳細に調べ、新しいスピン物理プラットフォームとしての可能性を実証することを目的とした。

[結果]

研究では当初予定していた実験研究を主に、分子動力学 (Molecular Dynamics: MD) シミュレーションによる理論研究も加えて、より多角的な観点から有機薄膜表面のアルカリ金属原子の挙動の理解を目指した。以下、実験と理論のそれぞれの結果について述べる。

実験では、図 1 に示す実験装置を開発した。

図に示されている超高真空金属容器は、下部がガラス管になっている。そこに光を 6 方向から入射し、ルビジウム原子をレーザー冷却技術の 1 つである磁気光学トラップで赤丸で示されたところに冷却・捕獲した。その後、水平に対して斜めに入射しているレーザーの周波数に差をつけることで、上方のプリズムに向けて原子を低速で打ち上げた (原子泉)。図 2 に打ち上げた原子をプローブ光の吸収で観測し

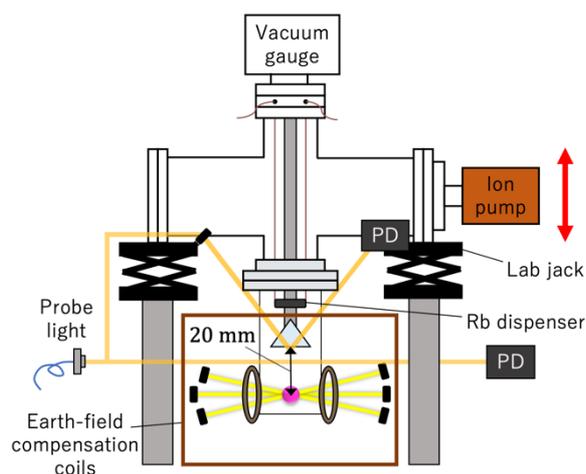


図 1 : レーザー冷却原子泉で表面入射した原子をエバネッセント場で分光する装置

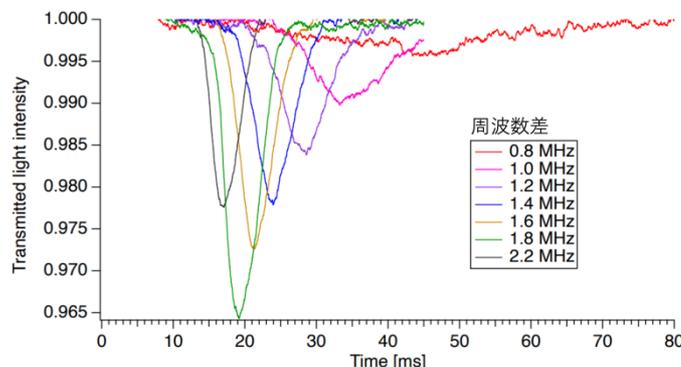


図 2 : 0 秒で打ち上げて観測領域に到達した原子の光吸収で測定した飛行時間スペクトルの打ち上げ光周波数差依存性

た飛行時間スペクトルを示す．周波数差を大きくすると早い時刻に原子が観測され始めることから，打ち上げ速さが大きくなっていることがわかる．解析によると，今回は 0.6 - 1.8 m/s の範囲で打ち上げ速さを変えて打ち上げることができた．この打ち上げた原子が到達するプリズム表面では，プローブ光の全反射によって生成されるエバッセント場で，表面近傍での分光ができる．図には示されていないが，この原子泉装置の実現のためのレーザー光学システムも含めて，今回の研究で開発を予定していた実験システムが完成した．

実験研究に並行して進めた MD による理論研究では，パラフィン（テトラコンタン）膜表面にルビジウム原子を速度を変えて入射した時の挙動をシミュレーションした．使用したソフトウェアは LAMMPS である．図 3 に示すように，ソフトウェア上に構築したパラフィン膜にルビジウム原子を様々な速度で入射したところ，吸着せずすぐに散乱する成分，100 ps

程度の短い時間表面に滞在する成分，シミュレーション中には脱離せず長時間表面に滞在する成分の 3 パターンに大まかに分類できることがわかった．またその割合は，入射原子の速度やパラフィンの温度に依存することがわかった．図 4 は，温度が 77 K のパラフィンに室温のルビジウム原子が入射した場合の滞在時間の分布を表したグラフである．2 割以上の原子が 200 ps 以上の長期にわたって滞在していることがわかる．そしてこの割合は表面が室温の場合より増えていた．今回の研究

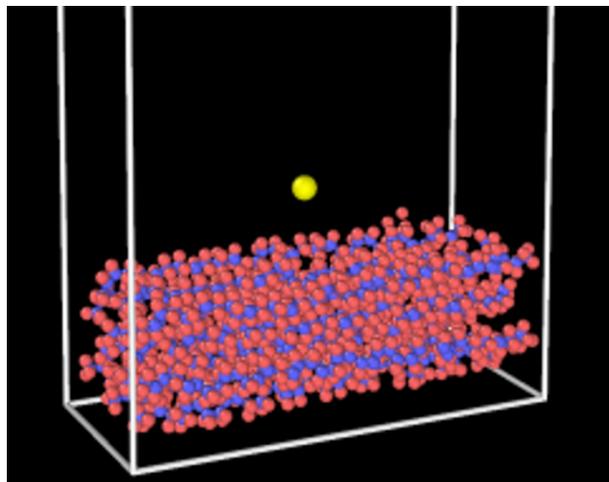


図 3： MD ソフトウェア上に構築したパラフィン膜（青丸：炭素原子，赤丸：水素原子）とそこに入射するルビジウム原子（黄色丸）

で特に注目している長期滞在成分の存在が理論的にも示唆されたことは重要であり，本シミュレーション結果で特徴的であった温度依存性に着目して実験的な検証を行う必要がある．

これらの成果は，学会等での 1 件の招待講演，2 件の口頭発表により報告された [2][3][4]．

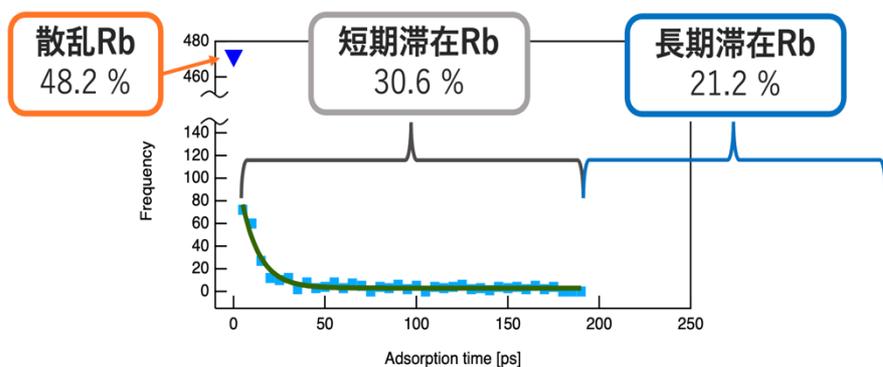


図 4： MD シミュレーションによって得られた，パラフィン膜（温度 77 K）に入射した室温のルビジウム原子の滞在時間の分布

[今後]

本研究では、パラフィン表面と相互作用するアルカリ金属原子の挙動を分光学的に明らかにするために、レーザー冷却技術を駆使した実験システムを作り上げることができた。また並行して、分子動力学計算により、パラフィン表面に入射したアルカリ金属原子の散乱・吸着過程についてシミュレーションを行った。これらの成果をもとに今後も引き続き実験・理論の両面から研究を進め、このアルカリ金属原子-パラフィン表面の系の理解を深めることで最終的な目標である新しいスピン物理プラットフォームの確立を目指す。

引用文献

[1] Kanta Asakawa, Yutaro Tanaka, Kenta Uemura, Norihiro Matsuzaka, Kunihiro Nishikawa, Yuki Oguma, Hiroaki Usui, Atsushi Hatakeyama, “Measurement of the temperature dependence of dwell time and spin relaxation probability of Rb atoms on paraffin surfaces using a beam-scattering method”, Physical Review A **104**, 063106 (2021)

本助成に関わる成果物

[論文発表]

なし

[口頭発表]

[2]塚崎雄志, 畠山温, 「原子泉とエバネッセント場を用いた原子-表面相互作用研究のための装置開発」, 日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月, オンライン)

[3]熊原思光, 畠山温, 「パラフィン表面におけるアルカリ金属原子の分子動力学シミュレーション」, 日本物理学会 2023 年春季大会 (2023 年 3 月, オンライン)

[4]畠山温, 「スピン緩和防止膜での原子ビーム散乱実験」, 第 2 回新方式精密計測による物理・工学的変革を目指す回路技術調査専門委員会 (2022 年 11 月, 北海道登別市) 招待講演

[ポスター発表]

なし

[その他]

なし