

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02933

研究課題名（和文）スピン偏極気体原子が起こす表面過程の包括的理解

研究課題名（英文）Comprehensive understanding about the surface processes of spin-polarized atoms

研究代表者

畠山 温（Hatakeyama, Atsushi）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70345073

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、スピン偏極したアルカリ金属原子と、その表面衝突時に起こるスピン緩和を抑制するパラフィン膜の相互作用の包括的な理解を目指し、多様な実験的研究を行なった。特筆すべき結果としては、これまで行われてきていなかったパラフィン表面での原子ビーム散乱実験によって、原子のスピン緩和、熱化、滞在時間、脱出速度分布の情報を統一的に得ることに成功したことである。これらは、スピン偏極したアルカリ金属原子とパラフィン膜相互作用の理解のための基礎として極めて有益である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気体原子のスピンは、原子時計や原子磁力計などの精密計測や、量子コンピュータや量子メモリなどの量子情報処理において重要な役割を果たす。その原子スピンの状態を保持するために用いられる気体容器表面コーティングであるスピン緩和防止膜（特にパラフィン膜）と原子の相互作用については、これまで推測の域を超えなかったり不明だったりが多かった。本研究では、膜表面での原子の振る舞いを多様な観点から実験的に明らかにすることができた。上述のような応用のさらなる発展に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：We conducted various types of experimental studies to comprehensively understand interactions between spin-polarized alkali-metal atoms and paraffin films, which are used to suppress the spin relaxation of alkali-metal atoms when the atoms collide with the surface. Our main result is to obtain information on spin-relaxation, thermalization, dwell times, and detaching velocity distribution of alkali-metal atoms at paraffin surfaces. This comprehensive knowledge is fundamentally important to understand interactions between spin-polarized alkali-metal atoms and paraffin films.

研究分野：原子物理学 / 量子エレクトロニクス / 表面科学 / スピン物理

キーワード：スピン偏極 表面 アルカリ金属原子 パラフィン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

希薄な気体原子は、外部からの擾乱の少ない、孤立した量子系として理想的な実験対象である。しかし、原子は閉じ込めている容器の内壁表面にぶつかることによりその状態が変わり、これが精密計測の妨げとなる。この状態変化、特に原子のスピン状態の変化を防ぐため、アルカリ金属原子に対して、ある種の有機薄膜が有効であることが知られている。広く利用されているのは、比較的大きな直鎖飽和炭化水素分子の膜（以下、パラフィン膜と呼ぶ）であり、多くの精密分光や量子制御に用いられている。

このような有益な特徴をもったアルカリ金属原子とパラフィン膜の系であるが、その相互作用は未だに良く理解されていない。これまで世界的に行われてきた研究で、偏極アルカリ気体原子とパラフィン膜の相互作用について次のような描像がある程度受け入れられている。

【吸着、拡散、脱離】吸着エネルギーはむき出しの金属やガラス表面に比べると小さく 0.1 eV のオーダー。原子は膜表面あるいは膜内を 1 μ s 程度拡散した後、脱離していく。

【スピン緩和】パラフィン膜における主な緩和要因は、アルカリ原子の電子スピンと原子の表面に対する回転運動との相互作用と、原子電子スピンと陽子核スピン間の双極子-双極子相互作用。

【光】紫外光の照射により原子の脱離が起こる。原子の膜中での拡散も速くなる。

【化学反応】スピン緩和防止機能が高くなるにはアニール処理が有効。何らかの化学反応とそれによる脱ガスの発生が示唆。

これに対して次のような基本的な問題が未解明である。

- ・ 散乱・吸着素過程の理解。たとえば鏡面反射のような散乱がおこらないのか。
- ・ 上記と関係して並進運動の熱化の時間スケールはどの程度か。
- ・ 膜表面・膜内で原子がどのような電子状態をとっているのか（化学反応含む）。
- ・ 光の影響はどのようなメカニズムを通じて及ぼされているのか。

これらの問題は本質的であり、「気体原子に影響を及ぼさない固体表面」の夢に向かうためにその理解は必要である。そして、スピン緩和防止メカニズムの理解やその性能向上にもつながると考える。さらに、スピン緩和防止コーティングの未知の性能、たとえば遅い熱化や表面や膜内で行える光操作など、が明らかになると期待できる。

2. 研究の目的

上で述べた背景に基づき、本研究では下記に挙げる目的を達成し、偏極アルカリ原子と緩和防止コーティング、特にパラフィン膜との相互作用の包括的な理解を目指す。

原子の運動学的な素過程（散乱、拡散、熱化）の測定

膜表面あるいは膜内での原子内部状態の解明

光が原子の拡散、脱離に与える影響のメカニズムの理解

スピン緩和と上記過程の関連付け

これらの目的達成のために、申請者のこれまでの研究成果に基づいた新たな計測手法の開発を行い、それを統合する形で新たな実験装置を組み上げて研究を進める。

3. 研究の方法

本研究では、多様な手法により、パラフィン膜でスピン偏極原子が起こす過程の包括的理解をめざす。まず、パラフィン膜での偏極原子を観察するための本研究独自の手法である運動誘起磁気共鳴分光と、光学的な分光方法の原理検証と測定を行う。続いて、原子の表面ダイナミクスを詳細に調べるための飛行時間測定の実験システムを作り、表面からの散乱や脱離のダイナミクスを時間分解して観測する。

4. 研究成果

まず、パラフィン膜でスピン偏極原子が起こす過程の包括的理解のために有用であると考えている新たな2つの分光実験の準備を進めた。1つめは運動誘起磁気共鳴分光法である。この方法は、表面に空間周期的な磁場を作り、その磁場中で原子の速度に応じて起こる磁気共鳴分光を観測する方法である。その準備のために、パラフィンコーティング膜表面でルビジウム原子ビームが散乱されるようすを詳細に調べた。その結果、ルビジウム原子は表面の衝突でスピン緩和は起こさないものの、並進運動はほぼ完全に1回の衝突で表面によって熱化されていることを明らかにできた。この結果に基づき、周期磁化表面にパラフィンをコーティングしそこにアルカリ金属原子を入射することにより、入射方向に依存した原子スピンの状態遷移を引き起こすことに成功した。遷移確率の分析から表面での原子のダイナミクスの情報が得られる可能性があったが、解析の結果、表面に衝突する前の状態遷移と仮定しても矛盾しないとの解釈も成り立ち、表面でのダイナミクスの分析はこの測定だけでは十分にはできないことが明らかになった。

2つめの分光が、コーティングと相互作用して広がりやシフトを起こしているはずの光吸収線の観測をめざす実験である。ただ、吸収は弱いと予想されるため、検討の結果、吸収を直接測るのではなく、光吸収によって起こるはずのスピン偏極の崩れを測定する方法を選択した。第一原理計算によるスペクトルの理論予測を並行して行いつつ測定したが、実験的な検出は成功せず、光検出の難しさが明らかになった。

この結果を受け、表面でのダイナミクスを直接測る方法として、アルカリ金属原子の散乱特性を時間分解で測定するための実験系を構築した。ターゲットは1マイクロ秒程度が予想される

パラフィン表面滞在時間の計測であり、真空系、光学系、計測系のすべてに渡る開発の末、必要な仕様を持った実験システムを構築した（図1,2に主に真空系部分を示す）。その装置を用いて測定した結果、今回の実験で表面でのルビジウム原子の凝集が始まった150 K付近までスピンの緩和は観測されず、また、表面滞在時間も一部で予想されていたマイクロ秒オーダーより短いことがわかった。パラフィン膜の温度を下げて行くと表面滞在時間が伸びスピン緩和確率も上がると予想されていたため、これらの結果は極めて興味深い。

パラフィン表面での化学反応や光応答については、光誘起原子脱離現象と、ガス発生の2点からも研究を行なった。まず、光誘起原子脱離現象の研究では、超高真空中においてもパラフィン膜表面でアルカリ原子が容易に酸化することを発見し、その状態からの光誘起脱離特性を明らかにした。アルカリ原子はさまざまな表面において酸化物として存在している可能性が高く、この結果は、いろいろな条件で観測されるアルカリ原子の光誘起脱離現象に統一的な視点を与えられる。

さらにガス発生の研究においては、パラフィン薄膜を施したルビジウム蒸気セル内部の残留ガスは、パラフィンとアルカリ原子の反応によって生じている可能性が高いため、その残留ガスを質量分析器によって分析した。水素分子に加えて、メタンより分子量の大きい炭化水素気体分子が多く発生していることが明らかになった。

最後に、パラフィンの持つアルカリ金属原子に対するスピン緩和防止機能の源を探るとともに本研究の応用的発展も見据えて、パラフィンコーティングに加え他の有機薄膜に対してのスピン緩和確率の測定を行い、従来は着目されてこなかった官能基を持つ物質も緩和防止機能があることを示唆する結果を得た。

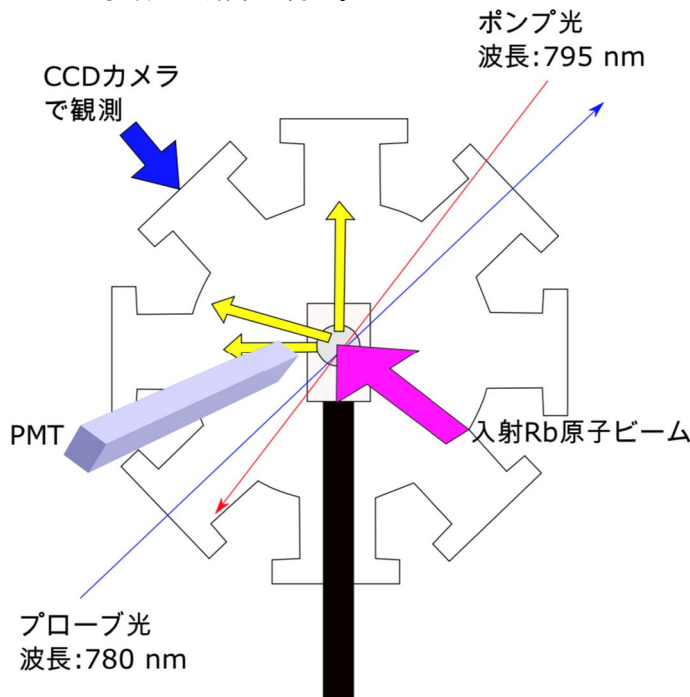


図1：ビーム散乱実験装置（上から見た概念図）。PMT：光電子増倍管

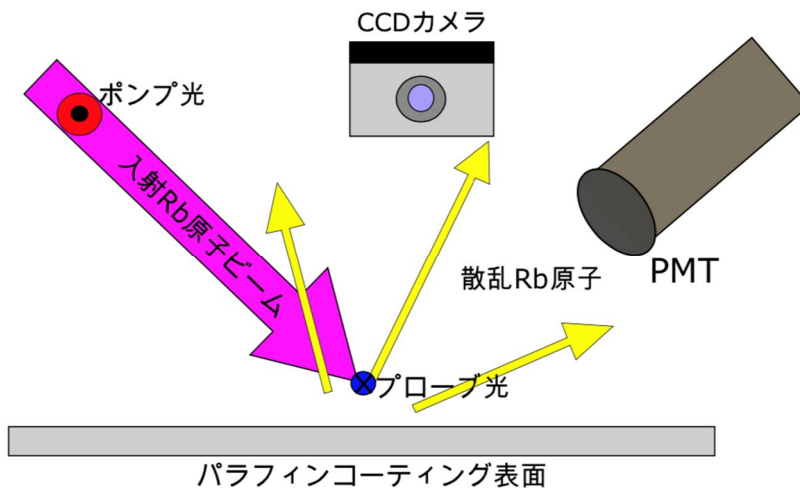


図2：ビーム散乱実験装置（横から見た概念図）。PMT：光電子増倍管

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sekiguchi Naota, Hatakeyama Atsushi, Okuma Kazane, Usui Hiroaki	4. 巻 98
2. 論文標題 Scattering of an alkali-metal atomic beam on anti-spin-relaxation coatings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 042709-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.042709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hatakeyama Atsushi, Kuroda Takahiro, Sekiguchi Naota, Ishikawa Kiyoshi	4. 巻 125
2. 論文標題 Analysis of background gas in an alkali-metal vapor cell coated with paraffin	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics B	6. 最初と最後の頁 133-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00340-019-7243-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 関口直太
2. 発表標題 スピン緩和防止コーティング表面で散乱されたアルカリ原子の角度分布と速度分布
3. 学会等名 第7回 超精密周波数計測とその比較技術による回路技術調査専門委員会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Sekiguchi, K. Okuma, N. Matsuzaka, H. Usui, and A. Hatakeyama
2. 発表標題 Scattering and spin manipulation of alkali atoms on solid surfaces coated with paraffin
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口直太、大熊風音、松坂騎弘、臼井博明、畠山温
2. 発表標題 パラフィンをコーティングした固体表面でのアルカリ原子の散乱とスピン緩和
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井崇暉、畠山温
2. 発表標題 スピン緩和防止コーティングにおけるアルカリ金属原子の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山温
2. 発表標題 アルカリ金属蒸気セルのスピン緩和防止コーティング
3. 学会等名 第13回超精密周波数計測とその比較技術による回路技術調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Sekiguchi and A. Hatakeyama
2. 発表標題 Scattering behavior and spin relaxation of alkali atoms on an anti-spin-relaxation-coated surface
3. 学会等名 International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Hatakeyama and S. Watashima
2. 発表標題 Light-induced atom desorption from alkali-metal oxides
3. 学会等名 International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠山温, 渡島紗瑛
2. 発表標題 アルカリ金属酸化物からの光誘起原子脱離
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	臼井 博明 (Usui Hiroaki) (60176667)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	