

## [研究助成 (C)]

## 原子ビームとねじり振り子による気体原子から 固体へのスピン移行の汎用的な検出

2237011



研究代表者 (助成金受領者) 東京農工大学 大学院工学府 博士後期課程 安田 瑠奈  
共同研究者 東京農工大学 大学院工学研究院 教授 畠山 温

## [研究の目的]

現在、量子コンピュータをはじめとした量子技術は我々の生活をより豊かにすると期待されている。量子技術において特に活躍するのがスピンである。スピンとは量子力学で記述される物理量で、量子技術で有用な二価性や磁性を持つとともに、古典力学における角運動量の性質も持ち合わせている。近年、スピントロニクスと呼ばれる分野では、スピンとエレクトロニクスを融合させた固体中のスピンのやりとりに着目して盛んに研究され、超省エネルギーな次世代デバイスの技術となることが期待されている。また、原子物理の分野ではスピン偏極気体原子を用いた周波数や磁場計測の精密計測に利がある。スピントロニクスを気体スピンにまで拡張できれば、スピン偏極気体原子を用いた実験の精密計測の強みをデバイス開発へ還元できる。そこで本研究が目指すのはスピントロニクス拡張のため、気体-固体間でのスピン移行過程を調べることである。気体-固体間でのスピン移行過程探索のため、まず、気体からの固体へのスピン移行の検出を行う。気体から固体へのスピン移行は2007年に限定的な範囲でIshikawaら[Phys. Rev. Lett. **98**, 183004 (2007)]によって実証されているが、本研究では一般的な固体、物質によって制限のない手法での観測を目指す。

## [研究の内容, 成果]

固体に移行したスピンを(古典力学的な)古典回転による観測をすることで、あらゆる物質に対するスピン移行を観測する技術の開拓を見込んでいる。本研究では、気体原子から固体へのスピン移行に誘起された古典回転の検出を目指す。スピン移行量を定量的に測定するにはスピン移行前後の正味の角運動量の大きさを測定する必要がある。スピン移行前の正味のスピンの大きさの測定として気体原子のスピン偏極度、スピン移行後の角運動量の測定としてトルクの測定が必要である。そこで、本研究では以下の2つのサブテーマに取り組んだ。

- (1) 気体原子スピン(気体原子が蓄えるスピンの大きさ)の定量的な測定
- (2) 光の角運動量が固体へ移行することで誘起されるトルクの定量的な測定

**(1) 気体原子スピンの定量的な測定**

気体原子のもつ正味のスピンの大きさの測定のため、気体原子全スピンの大きさ $\langle F_z \rangle$ の測定方法の提案し、実際に測定を行った。

まず、原子全スピン $F$ の構成を図1に示す。閉殻の電子は角運動量を持たないので、本研究で用いたアルカリ金属原子では、1個の荷電子のみが電子の角運動量を担う。電子スピン $S$ と電子の軌道角運動量 $L$ が合成されて $J$ に、核スピン $I$ と $J$ が合成されて、全スピン $F$ となる。

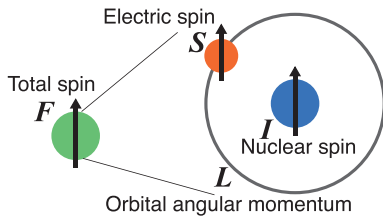


図1 原子スピンの構成の模式図

気体原子のスピンの1成分の大きさ（偏極度）を測定する方法はこれまでにいくつか提案されているが、本研究で重要な全スピンの大きさ $\langle F_z \rangle$ の測定方法は我々の知る限り存在しない。そこで本研究では、測定手法を提案し、実際に測定を行った。提案した方法は、Beerの法則が成り立つ気体に対して広く使える手法である。

図2のように、セルと呼ばれるガラス容器を真空に引き、アルカリ金属原子のセシウム(Cs)を封入したものを用いて測定を行った。アルカリ金属原子は価電子が1個で理論との比較がしやすいこと、共鳴するレーザーの波長は赤外線で、比較的蒸気圧が高く信号を得やすいことから、原子物理の分野で広く利用されている。気体原子は円偏光の光を吸収することで、気体原子はスピン偏極をする。また偏極気体原子はガラス表面などに衝突することで、スピンを失う（スピン緩和）。

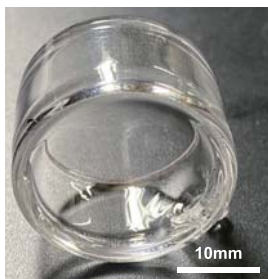


図2 セシウムセル

提案した手法は、基本的に原子が吸収する光のパワーが、原子が占有するエネルギー準位に依存する（図3、赤線の太さが光の吸収強度に比例）ことを利用している。レーザーの周波数をドップラー広がりよりも広く挿引することで、

原子のもつ速度によらず、全ての原子を観測する。また、 $\sigma^+$ と $\sigma^-$ 偏光でそれぞれ測定し、無偏極状態の時の吸収量で規格化することで様々な定数を取り除き、ゼーマン偏極度のみを取り出した。測定は、一般的なガラス製のセル（無コーティングセル）と、スピン緩和防止コーティングを施すことで高いスピン偏極が見込めるコーティングセルに対して行った。

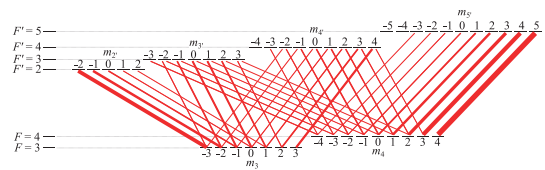


図3 Csのエネルギー準位と光の吸収強度

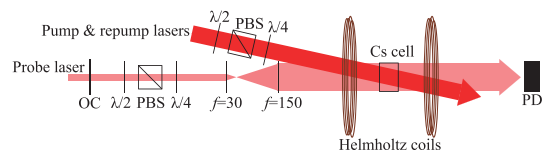


図4 スピン偏極度測定装置図

図4に測定システムを示す。ポンプ光でCsのスピン偏極を誘起し、プローブ光でスピン偏極度の測定を行った。プローブ光のセル透過後のパワーの変化をフォトダイオードで検出することで、原子によって吸収された光のパワーを測定した。組み合わせレンズを用いてプローブ光の直径を広げ、セル内の原子をより多くプローブした。また、光学チョッパーを利用してロックイン測定を行うことで透過光パワーの微小な変化も検出できる。量子化軸の定義のため、ヘルムホルツコイルで地磁気よりやや大きい磁場(0.3 mT程度)を印加した。以下に結果の一部を示す。

図5に、ポンプ光パワーと $\langle F_z \rangle$ （左軸）、占有率（右軸）の関係を示す。ポンプ光パワーが強くなると、スピン偏極度が単調増加している様子が分かる。また、6 mW程度で $\langle F_z \rangle$ が飽和していることが分かる。さらに、図6には、ポンプ光の偏光を変化させた時の $\langle F_z \rangle$ と占有率を示す。ポンプ光を直線偏光にしたとき横軸

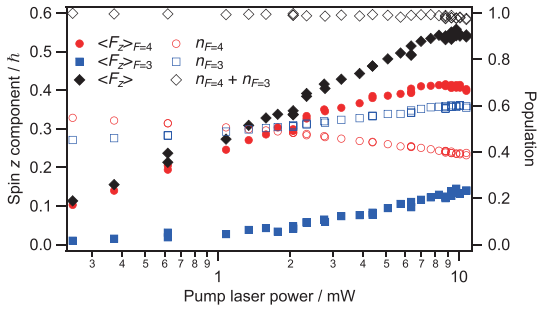


図5 ポンプ光パワー依存性

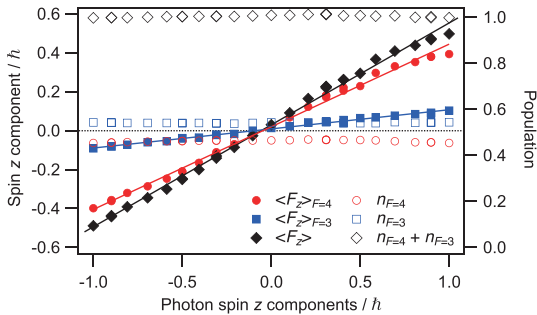


図6 ポンプ光偏光依存性

の値が0で、検出される  $\langle F_z \rangle$  も0となっている。一方で占有率はポンプ光の偏光に依存せず、一定の値をとっている。

これらは定性的に理論と一致し、適切に測定が行われていると考えられる。さらに測定の確からしさを評価するために、簡単なモデル(図7)を立ててスピン収支の見積もりを行った。

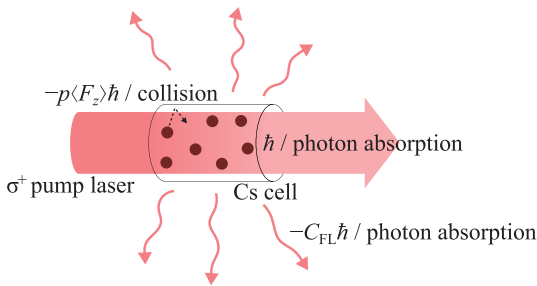


図7 スピン収支モデル

このモデルでは、気体原子が光を吸収することで気体原子がスピンを得る。また、気体原子がセル壁面に衝突することでスピンを失う。壁面との衝突によるスピンの損失は、気体原子のセル壁面との衝突頻度と  $\langle F_z \rangle$  から計算し、衝突頻度は気体原子の速度と原子密度、セルの形

状から計算することができる。

光の吸収によるスピン注入レートは  $4 \times 10^{15}$   $\hbar/s$  であり、1回の衝突で100%スピンの崩れると仮定した場合の衝突による損失レートは  $2 \times 10^{15}$   $\hbar/s$  である。蛍光による損失や不確かさを含めると今回の測定は妥当で、提案した手法は  $\langle F_z \rangle$  を正しく測定通りに測定出来ていると考えられる。

この成果は学術論文誌<sup>[1]</sup>、国内学会<sup>[2]</sup>にて発表済みである。

## (2) トルクの定量的な測定

ここでは、2重ねじり振り子を開発し、光の角運動量によって誘起されたトルクの測定を行うことで、開発したねじり振り子がトルクを正確に測定できるかどうか、を確認した。

光の角運動量が固体へ移行すると、結果として古典回転が誘起されることは、Bethの実験や近年盛んに行われている光のスピン角運動量や軌道角運動量を用いて微粒子を回転させる実験からよく知られている。しかし、誘起された回転のトルクを定量的に測った例は少ない。特に、光の軌道角運動量について直接かつ定量的に測った例はなく、Angular Doppler効果を利用して間接的な測定が行われたのみである。ここでは、光のスピン角運動量の誘起するトルクの測定をベンチマーク実験として行い、軌道角運動量が誘起するトルクの測定を行った。ねじり振り子の評価のための実験であるが、光の軌道角運動量の誘起するトルクの定量的な測定は個別の研究としても十分に意味がある。

開発した2重ねじり振り子(図8)は、1段目の共鳴周波数を小さく、2段目の共鳴周波数を大きくしている。振動特性から、1段目は外部からのノイズ振動を遮断するアイソレータとして働き、2段目がトルクセンサとして働くこと狙っている。また、空気による減衰や、擾乱などを除くため、ねじり振り子は真空チャンパー内に吊られており、その圧力は  $10^{-5}$  Pa程度である。トルクを注入する光(緑)は振り子

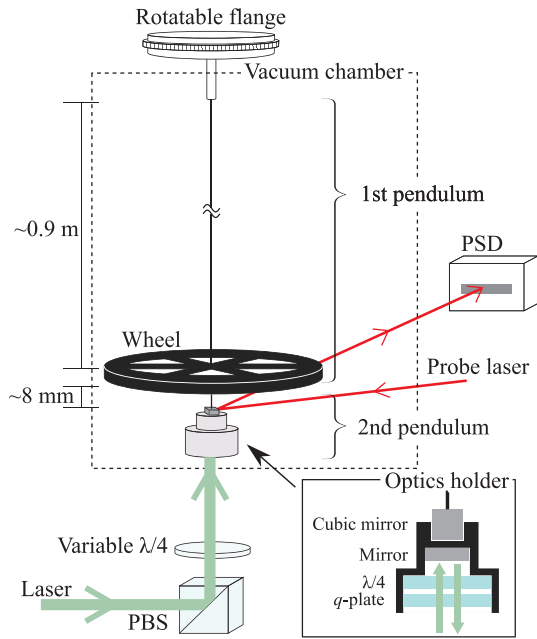


図8 開発した2重ねじり振り子

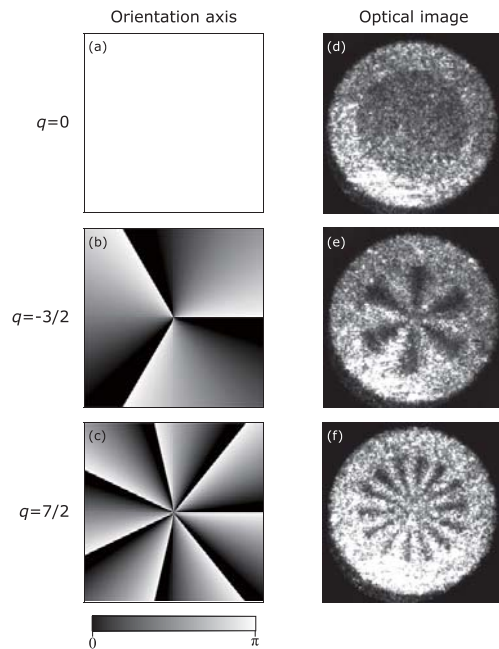
に対して下から入射し、光テコ（赤）によって振り子の回転角を測定した。入射する光の角運動量の向きを周期的に切り替えることで、強制振動によって回転振幅を増幅し、ロックイン検出によって小さな回転振幅を検出した。

本実験は今後論文に投稿予定のため、詳細は公開できないが、概要を以下に示す。

まず、1光子あたり  $2\hbar$  の角運動量移行が期待される  $1/4$  波長板を用いて測定をベンチマーク実験として行った。この時の測定によって得られたトルクの大きさは  $(9.0 \pm 1.4) \times 10^{-16}$  Nm である。入射光の波長とパワーと偏光から予想されるトルクの大きさは  $7.5 \times 10^{-16}$  Nm であるので、不確かさのなかに僅かに入らないが、矛盾がなく測定できている。次に入射光の波長とパワーをそのままに、偏光のみを変えて測定を行い、予想トルクと検出トルクは一致し、光のスピンの由来のトルクが測定できていることがわかった。

この装置を用いて、スピン角運動量を持つ光に軌道角運動量を付与する（スピン-軌道相互作用のある）光学素子が受けるトルクの測定を行った。用いた光学素子は  $q$ -plate と呼ばれるもので、 $1/2$  波長のリターダンスを持つが、光

学軸の向きが一樣でない（図9(a)-(c)）。これら3つの  $q$ -plate は共同研究先が作製した[Nature photonics **8**, 610 (2014)]。図9(d)-(f) は直交する偏光板の間に  $q$ -plate を置き、透過光の撮影を行った写真である。光学素子によって付与される軌道角運動量が  $q$  の大きさに依存し、 $2q$  である。スピン角運動量の変化も含めると、円偏光の光が  $q$ -plate を透過することによって変化する角運動量の大きさは、 $2(q-1)\hbar/\text{photon}$  であるので、角運動量保存則から、光学素子が受け取る角運動量の大きさは  $2(1-q)\hbar/\text{photon}$  である。

図9  $q$ -plate の光学軸の空間分布と写真

$q=0$  の  $q$ -plate に生じたトルクの大きさは  $(7.9 \pm 0.8) \times 10^{-16}$  Nm である。入射光の波長とパワーと偏光からの予想トルクは  $7.2 \times 10^{-16}$  Nm で不確かさの範囲内で測定結果に一致する。

また、 $q=-3/2$  の  $q$ -plate に生じたトルクの大きさは  $(2.6 \pm 0.3) \times 10^{-15}$  Nm であった。入射光の波長とパワーと偏光からの予想トルクは  $2.9 \times 10^{-15}$  Nm で不確かさの範囲内で測定結果に一致する。

この成果に関しては、実験セットアップが難しい都合上実験に時間がかかり、 $q=7/2$  の  $q$ -

plate の測定はまだ行えていない。3つの素子に関する測定の完了後、論文にまとめて投稿予定である。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究で、気体原子スピンの正味の大きさ  $\langle F_z \rangle$  の測定が行えるようになった。また、開発したねじり振りが微小なトルクを正確に測れることもわかった。今後、原子スピンから固

体へのスピン移行量を測定するために、原子ビームを作製しビーム流量を評価する。その後、スピン偏極気体原子から固体へのスピン移行に誘起されたトルクの検出を行う。

[成果の発表, 論文など]

- [1] Phys. Rev. A **111**, 033111 (2025).
- [2] 安田瑠奈, 畠山温, “スピン偏極セシウム原子の全角運動量  $z$  成分の測定,” 日本物理学会 2023 年年度大会, 東北大学, 18aB204-1, 9月, 2023年.