



東北大学

報道機関各位

平成23年10月13日
東北大学大学院理学研究科

**光が作るスピンの塊り
～磁石でないものを光で磁石にする～**

<概要>

東北大学大学院理学研究科の石原純夫准教授らのグループは、光の照射により酸化物中の電子のスピンの大きさが変化する“スピン転移”^②と呼ばれる現象が高速に起き、“スピンの塊り”（図1参照）ができることを、理論計算シミュレーションにより示すことに成功しました。本研究の成果は、平成23年10月14日（米国東部時間）発行（予定）の米国物理学会誌 *Physical Review Letters* に受理されオンライン版に公開されました。

<背景>

電子のもつスピンの自由度をエレクトロニクスに利用するスピントロニクスとよばれる研究が、近年盛んに行われています。そこでは集積回路を流れる電流や記憶装置に電子のスピンの利用するもので、電子の電荷を利用するこれまでのエレクトロニクスに比べて情報量が格段に増えるものと期待されています。この技術を実用化するにあたって、外部からスピンをいかに高速にかつ効率よくコントロールすることができるかが技術の発展のカギとなっています。光はその強度や周波数、偏光を比較的容易に変化させることができるため、近年の超高速光学技術の発展に伴いスピンを高速にコントロールできる手段として大きな注目を集めています。光によりスピンを変化させる例としてこれまでよく知られているものに、スピントロニクスとよばれる金属錯体があります。浮世絵の青色顔料として用いられるプルシアン・ブルー（ペロ藍）という物質の仲間が有名で、特定の光を当てることでこの物質に含まれる金属イオンがスピンのない状態からある状態へと変化（スピン転移）を起こします。しかしながら、この現象でスピンのある状態が全体に広がるには格子の弾力的な力が必要なためその応答速度に限りがあり、より高速な応答を期待できる別の機構のスピン転移現象が望まれています。

<研究内容>

本研究ではコバルト・イオンを含む酸化物において、光によるスピン転移の機構を明らかにし、これが従来のスピン転移現象より高速な応答となることを理論シミュレーションにより示しました。つまり、磁石ではないものに光を当てることで、どのようにして、そ

してどのくらい速く磁石となるのかを大規模数値計算用クラスター型計算機³⁾を用いることで突き止めました。

研究の対象となるコバルト酸化物 RBaCo_2O_6 (R は希土類金属イオン) に非常に短い時間のパルスのレーザー光を照射するポンプ・プローブ分光実験⁴⁾は、J S T の戦略的創造研究推進事業 (C R E S T) 「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」領域に所属する東京工業大学大学院理工学研究科・腰原伸也教授のグループの沖本准教授らによりなされました (米国物理学会誌 *Physical Review B*、9月15日号に掲載済み)。そこでは光を照射後 150 フェムト秒 (1 フェムト秒は千兆分の一秒) という極めて短い時間で光の反射率が変化すること、これが温度の上昇による反射率の変化と著しく異なることが示されています。本理論シミュレーションの結果、このような超高速な応答は以下のようなプロセスで起きるスピン転移であることが分かりました。

i) 光をあてる前の状態は、コバルト・イオンがスピンをもたない低スピン状態²⁾とよばれる電気を通さない絶縁体です (図 2 参照)。これに光を当てるといくつもの電子と正孔 (ホール)⁵⁾が作られます。これらが物質の中を動き回り同じ向きのスピンをもつ電子と正孔が出会うことで、コバルト・イオンが大きなスピンをもつ高スピン状態²⁾が作られます。このプロセスは電子と正孔の運動が原因となっているため、図 3 に示したようにおよそ 100 フェムト秒という極めて短い時間で起きます。

ii) このようにしてできた高スピン状態は、ほかの正孔と強く結合してできる“スピンの塊り” (束縛状態) をつくることで、その後も比較的安定した状態として維持されます (図 4)。このスピンの塊りは、実験で観測されたように光反射率に特徴的な変化を引き起こすことが示されました。

本研究ではこのように、光の照射により高速に“スピンの塊り”ができることを説明し、室温付近で起きる超高速な光応答の実験をよく再現することに成功しました。

<今後の展開>

本研究では、光により高速にスピン転移を起こすメカニズムを理論的に明らかにしました。ここで示された機構は今回実験のなされたコバルト酸化物のみならず、鉄の酸化物や有機化合物などの広い範囲の物質において実現可能であります。今後理論計算で示された方針をもとに、より高速にスピン転移を起こす物質の探索や設計が期待されます。今回の現象を超高速スピンスイッチなどのデバイスとして応用するためには、より少ない光で転移を起こすために効率を増大させたり、もとの状態に戻る緩和過程をより詳しく調べる必要があります。今回の研究結果をもとに更なる指導原理を追求することで、これらの点を実証する予定です。

本研究は、東北大学大学院の金森悠 元大学院生、ならびに仙台高等専門学校の松枝宏明准教授との共同研究です。また本成果は、J S T 戦略的創造研究推進事業 (C R E S T) 研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」研究課題名：「光技術が先導する臨界的非平衡物質科学」研究代表者：腰原伸也 (東京工業大学大学院理工学研究科教授)、ならびに文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」研究代表者：五神真 (東京大学大学院理学系研究科教授) によって得られたものです。

<用語解説>

注 1) 電子のスピン

電子は負の電気をもつと共に、微小な磁石としての働きをもちこれはスピンと呼ばれます。古典的にはスピンは電子の自転により生じると解釈されます。金属中の電子のスピンが全方向に整列することで、鉄やニッケルなどは磁石の性質をもちます。

注 2) スピン転移、低スピン状態、高スピン状態

固体や分子に含まれるコバルト・イオンや鉄イオンは、結晶構造の違いや外部から加える圧力や温度により、大きさの異なるスピンを取ります。例として図 2 に 3 価のコバルト・イオンが取るスピンの状態を示しました。上向きのスピンと下向きのスピンの電子が同数存在する状態では、イオン全体でスピンの向きが打ち消しており、これを低スピン状態と呼びます。一方、上向きスピンの電子数が多い状態は、イオン全体としてスピンが残りこれを高スピン状態と呼びます。スピン転移とはこの様な異なるスピンの状態が変化することです。

注 3) クラスタ型計算機

複数のコンピュータや中央演算処理装置(CPU)を連結 (クラスタ化) することで、一つの計算システムのように取り扱うことのできる計算機をクラスタ型計算機と呼びます。数値演算を CPU の数だけ分割して同時に行うことができるため、大規模な数値シミュレーションを高速に実行することができます。

注 4) ポンプ・プローブ分光実験

物質に強いパルス光を当てると、系は高いエネルギーの状態に移ります。これに別の光を当てることでこのその状態や元の状態への緩和について調べることができます。前者をポンプ光 (励起光)、後者をプローブ光 (測定光) とよび、この様な実験はポンプ・プローブ分光実験として近年盛んに研究がなされています。物質の高いエネルギーの状態について知見が得られるのみならず、通常環境では実現することのできない物質の隠れた状態が

発現するものと期待されています。

注 5) 正孔 (ホール)

絶縁体や半導体のエネルギー準位には、電子が占有する準位と空の準位の間エネルギーの差 (ギャップ) が存在し、前者を価電子準位、後者を伝導準位と呼びます。光が吸収されると電子が価電子準位から伝導準位へと移ります。このとき電子が占有していた価電子準位に孔が生じることになり、この孔は正の電荷をもった仮想的な粒子と見なすことができます。この孔が正孔 (ホール) です。

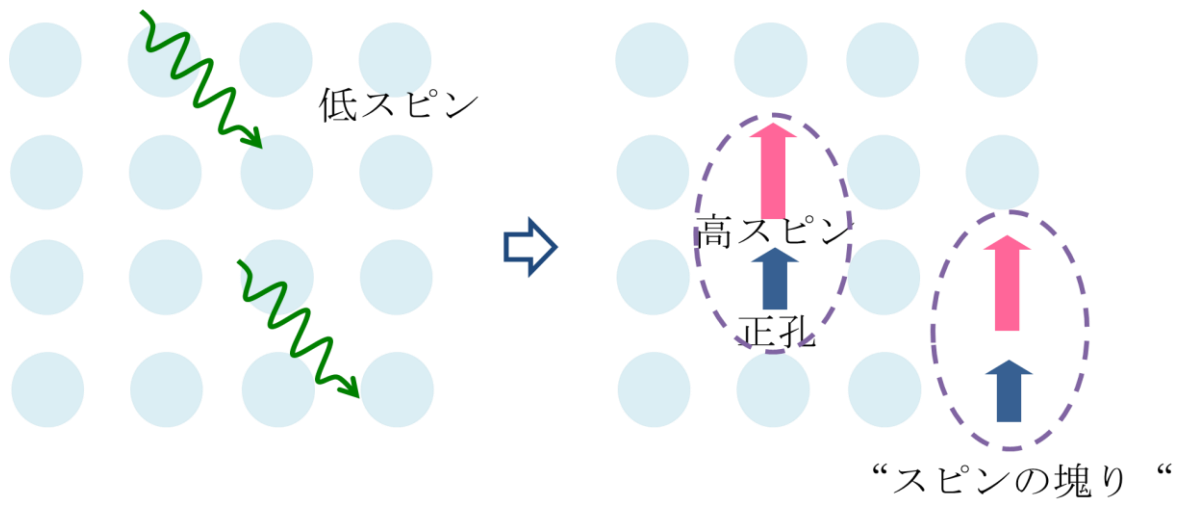


図1：コバルト酸化物において、光を当てることで低スピンが高スピンと正孔からなる“スピンの塊り”ができる様子の模式図。

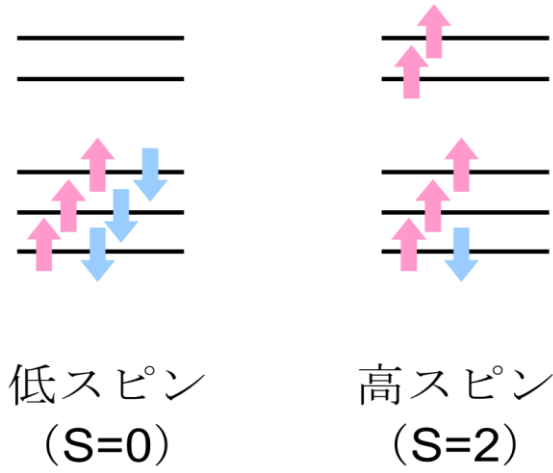
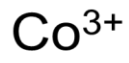


図2: 3価コバルト・イオンにおける低スピン状態と高スピン状態。矢印は電子のスピンの向きを表す。低スピン状態では上向きスピン電子と下向きスピン電子が同数存在し、全体でスピンの無い状態(スピンの大きさ $S=0$)となる。高スピン状態では上向きスピンの電子数が多いため、イオン全体で大きなスピン($S=2$)を示す。

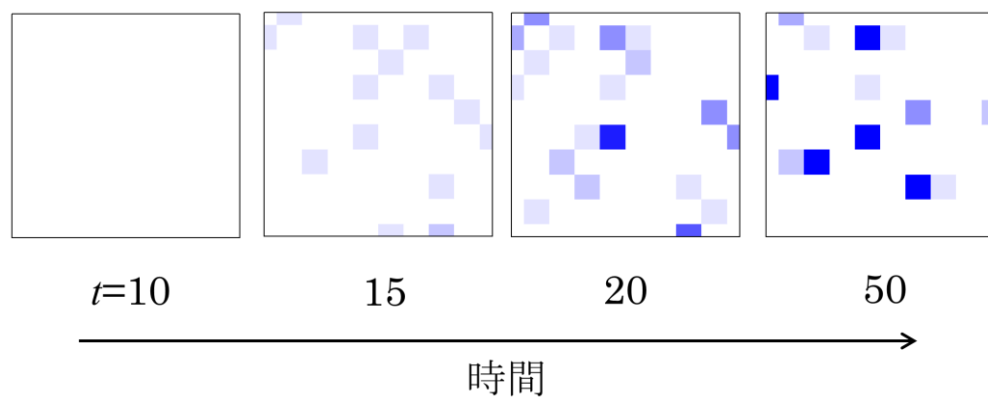


図3：シミュレーションにより得られた、低スピン状態に光を照射した後にできる高スピン状態の空間分布の時間経過。tは光を当てた後の経過時間で、t=50はおよそ100フェムト秒に相当する。青い箇所が高スピが生じた部分を表わす。

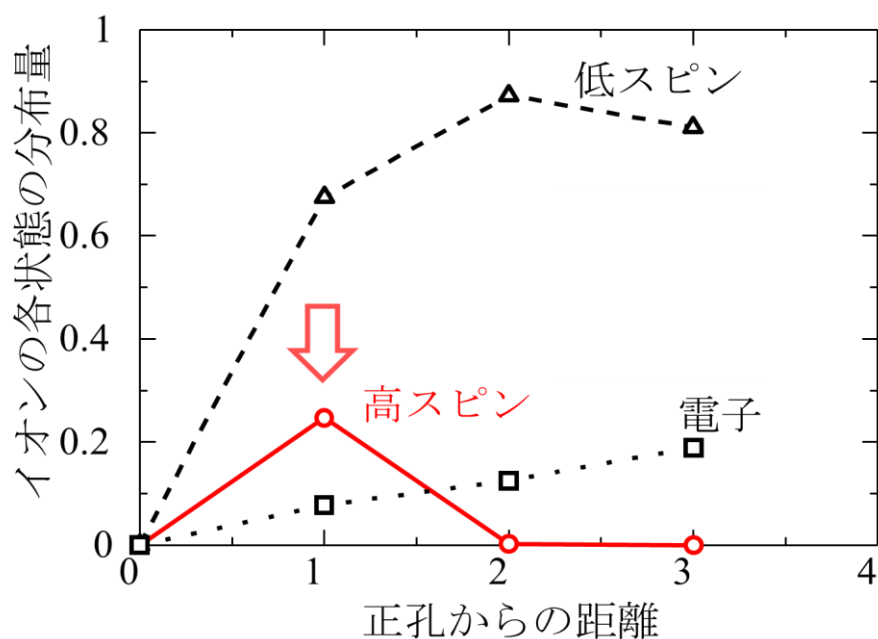


図 4: シミュレーションにより得られた、低スピン状態に光を照射した後にできるイオンの各状態の分布量。横軸は光により作られた正孔からの距離をあらわす。正孔の隣に高スピンの存在することが示されている。

<論文名および著者名>

“Photoinduced change in the spin state of itinerant correlated electron system”

(遍歴型電子相関係における光誘起スピン状態変化)

Y. Kanamori, H. Matsueda, and * S. Ishihara (*Corresponding author)

掲載誌: Physical Review Letters (米国物理学会誌)

(お問い合わせ先)

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻

石原純夫准教授

Tel: 022-795-6436

E-mail: ishihara@cmpt.phys.tohoku.ac.jp