

報道発表資料 (1/5 ページ)

2019年7月5日(金) 14時

光のスピンの光渦によるナノ粒子の公転運動を加速する新原理を解明！

大阪府立大学(学長:辰巳砂昌弘) LAC-SYS 研究所のチーム(大学院理学系研究科 田村守 特認助教、飯田琢也 准教授・所長、大学院工学研究科 床波志保 准教授・副所長)は、千葉大学(学長:徳久剛史)大学院工学研究院/分子キラリティー研究センターの尾松孝茂 教授・センター長との共同研究により、光渦の下でのナノ粒子の公転運動が、光のスピンのによって加速・減速される新原理を世界に先駆けて解明しました。[本研究は主に文部科学省 科学研究費新学術研究領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」(代表:石原 一)などの支援を受けて行われました]

■本研究のポイント■

従来の研究で知られていたこと

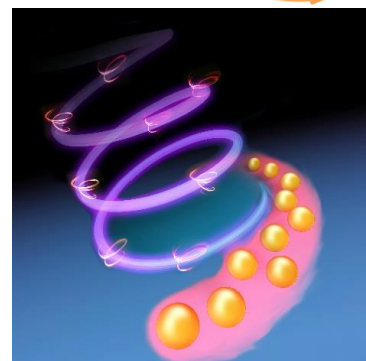
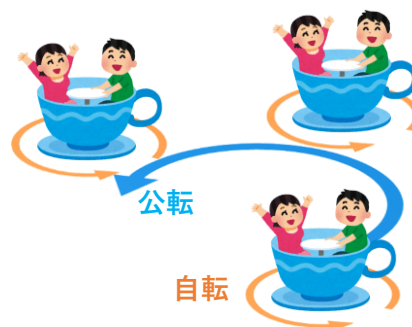
- ・ 光渦は軌道角運動量を持ち、トラップした物体を太陽の周りを回る地球の様に公転運動させ、また円偏光の光はスピン角運動量を持ち、トラップした物体をその場で自転させる。
- ・ 大きな物体を光渦でトラップした場合は、その物体はその場で自転し、軌道角運動量が自転運動を誘起する。

★今回の新発見

- ・ スピン角運動量を持つ円偏光の光によって、粒子の公転運動を加速・変調する粒子操作の新原理を発見

●今後どうなる？

- ・ 物質の光操作技術の更なる高度化に貢献
例えば、光で粒子を綺麗に配列する技術や、光の力を用いたレーザー加工技術などに応用可能



例えば、遊園地にあるコーヒーカップの乗り物は、ステージの上でカップが公転すると共に、それぞれのカップ自体も自転しますが、自転が公転の速度に影響を与えるようなことはありません。一方で、光で小さな粒子を操作する際は、そのような不思議な現象が生じます。光で物体を動かせることは既に常識となりつつありますが、本研究では光渦と呼ばれる渦を巻く光線の下で公転運動するナノ粒子集団の速度を、光のスピンのによって加速・変調できる新原理を世界に先駆けて理論的に解明しました。この成果は、物質の光操作技術をより高度にするものであり、例えば光で粒子を綺麗に配列する技術や、光の力を利用したレーザー加工技術などの発展に貢献するものと期待されます。

研究論文名：Interparticle-Interaction-Mediated Anomalous Acceleration of Nanoparticles under Light-field with Coupled Orbital and Spin Angular Momentum
(軌道・スピン角運動量が結合した光場の下で粒子間相互作用が介するナノ粒子の異常な加速)

著者：田村守^{1,2}、尾松孝茂^{3,4}、床波志保^{2,5}、飯田琢也^{1,2}
(1 大阪府立大学大学院理学系研究科、2 大阪府立大学 LAC-SYS 研究所、3 千葉大学大学院工学研究院、4 千葉大学分子キラリティー研究センター、5 大阪府立大学大学院工学研究科)

公表雑誌：Nano Letters (米国化学会(ACS)の科学論文雑誌)

公表日時：2019年7月5日(金)14時 ※日本時間 (米国東部標準時 2019年7月5日(金)1時)

【研究に関するお問い合わせ】 大阪府立大学 大学院理学系研究科/LAC-SYS 研究所 TEL:072-254-8132

特認助教 田村守 Mail: m-tamura [at] p.osakafu-u.ac.jp、准教授・所長 飯田琢也 Mail: t-iida [at] p.osakafu-u.ac.jp

千葉大学 大学院工学研究院/分子キラリティー研究センター 教授・センター長 尾松孝茂 Mail: omatsu [at] faculty.chiba-u.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。

報道発表資料 (2/5 ページ)

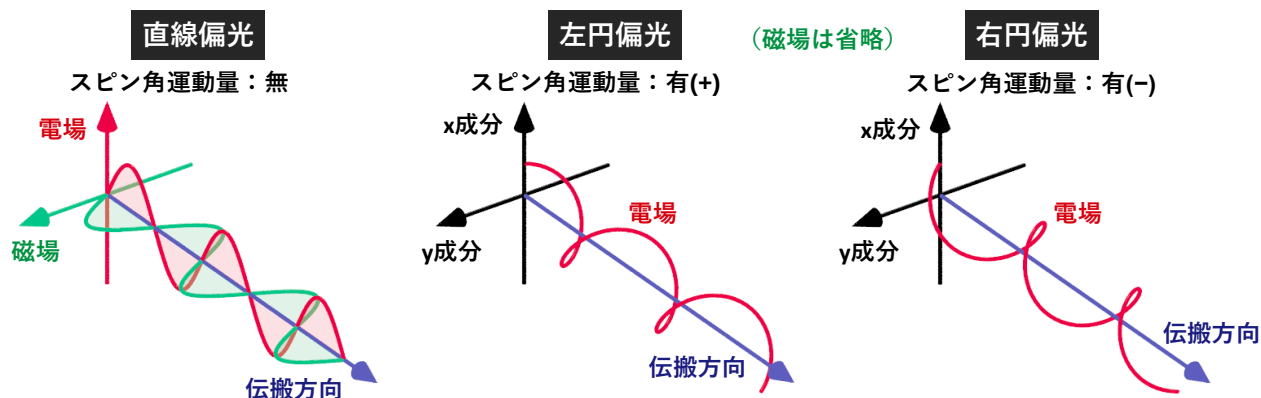
2019 年 7 月 5 日 (金) 14 時

1. 研究の背景

光の力で小さな粒子を動かすことができる光ピンセット(解説1)の開発と生物システムへの応用に関して Ashkin 博士がノーベル物理学賞を受賞しましたが、現在この技術は物理・化学・生物学など分野を超えて幅広く利用されています。特に、光が粒子に当たり散乱や吸収される際に、光が持つ運動量が粒子に受け渡されることで、光で粒子を押すことができます。一方で、光に角運動量を与えることもでき、散乱や吸収で角運動量を粒子に受け渡すと、粒子にトルク(解説2)が作用し、粒子は回転することになります。ここで興味深いのは、光は二種類の角運動量を持つことができ、それぞれ異なった種類の回転運動を粒子に引き起こすことができます。

光は電磁波であり、電場と磁場が直交して振動しながら伝搬する波ですが、そのように特定の方向に振動する性質を偏光(解説3)と呼びます。図1に示すように、特定の方向に電場と磁場が振動する直線偏光に対し、振動方向が回転する光の状態を円偏光と呼びます。特に円偏光状態は、左円偏光と右円偏光がそれぞれ正と負のスピン角運動量を持つことが知られており、そのような光によってトラップされた粒子は、図2に示すコマの様にクルクルと自転します。一方で、1992年に発見された光渦と呼ばれる光線は、ドーナツ状の強度分布を持ち、らせん状に伝搬します。光渦は軌道角運動量を持つことが知られており、光渦によってトラップされた粒子は、図2に示す太陽の周りを回る地球のように、そのドーナツ状の強度分布の上で公転運動を生じることになります。このようなスピン・軌道角運動量による回転運動の研究は、特に光ピンセットが開発されてから盛んに行われてきました。

図1：光・電磁波の偏光状態とスピン角運動量



【研究に関するお問い合わせ】 大阪府立大学 大学院理学系研究科/LAC-SYS 研究所 TEL:072-254-8132

特認助教 田村守 Mail: m-tamura [at] p.s.osakafu-u.ac.jp、准教授・所長 飯田琢也 Mail: t-iida [at] p.s.osakafu-u.ac.jp

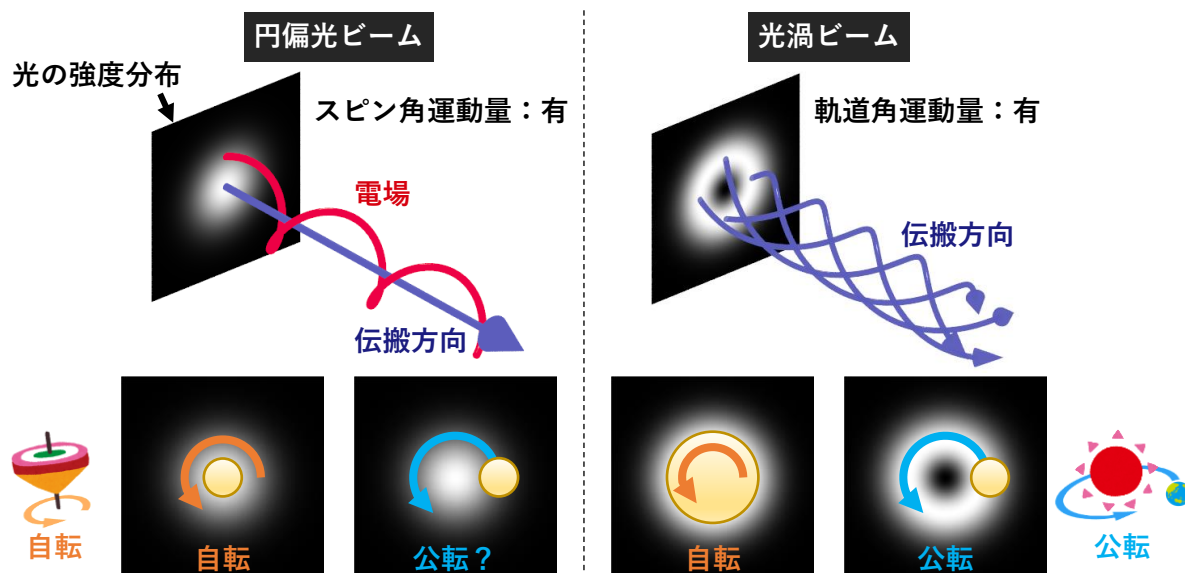
千葉大学 大学院工学研究院/分子キラリティー研究センター 教授・センター長 尾松孝茂 Mail: omatsu [at] faculty.chiba-u.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。

報道発表資料 (3/5 ページ)

2019 年 7 月 5 日 (金) 14 時

図 2：円偏光・光渦のビームと、粒子に誘起される回転運動



さて、これらのスピンと軌道の角運動量はどちらも似た性質を持ち、互いに変換可能であると考えられています。例えば、上述の自転と公転の運動は互いに無関係に生じるわけではなく、**図 2** の光渦ビームにおいて、ドーナツ状の強度分布と比べ十分に大きい粒子がトラップされた場合は、軌道角運動量はもはや公転運動を誘起することはできず、粒子は自転運動を生じることになります。ここで問題になるのは、スピン角運動量は果たして粒子に公転運動を誘起できるのかということです。**図 2** にその概念図を示していますが、粒子がビームの端で公転するような理屈を考えるのは困難です。

しかし本研究では、円偏光の光渦ビームの下で、複数のナノ粒子をトラップした際に、スピン角運動量が粒子の公転運動を加速・変調できることを示す全く新しい原理をシミュレーションに基づいて理論的に解明しました。この不思議さを直感的に捉えるならば、初めに述べた遊園地のコーヒーカップの例が出てくるわけです。コーヒーカップを速く回すことで、その公転の速度まで加速されるとは到底考えられませんが、以下で述べるように、光でトラップした複数のナノ粒子が相互作用する場合には、そのような不思議な現象が生じます。

2. 研究内容と成果

円偏光光渦を直径 70nm の金ナノ粒子に照射する状況を想定し、粒子に作用するトルク (**解説 3**) や、粒子の運動の時間発展をシミュレーションにより評価しました。ここで運動の時間発展の評価手法として、我々が独自に構築してきた「光誘起力ナノ動力学法」を用いました。

円偏光光渦の下でナノ粒子に作用する光誘起力およびトルクを評価した結果、粒子が複数存在する場

【研究に関するお問い合わせ】 大阪府立大学 大学院理学系研究科/LAC-SYS 研究所 TEL:072-254-8132

特認助教 田村守 Mail: m-tamura [at] p.sosakafu-u.ac.jp、准教授・所長 飯田琢也 Mail: t-iida [at] p.sosakafu-u.ac.jp

千葉大学 大学院工学研究院/分子キラリティー研究センター 教授・センター長 尾松孝茂 Mail: omatsu [at] faculty.chiba-u.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。

報道発表資料 (4/5 ページ)

2019年7月5日(金) 14時

合に、右円偏光よりも左円偏光の方が、トルクが大きいことを解明しました(図3)。比較対象として、1粒子の場合は円偏光の違いによるトルクの変化は生じず、複数粒子の場合のみに変化が生じます。

このような現象が生じる理由として、円偏光の光が引き起こす粒子の運動が1粒子と複数粒子の場合で異なることが挙げられます。1粒子の場合は、粒子は単にその場で自転するためのトルクを受けるだけです。しかし複数粒子の場合は、個々の粒子が自転するためのトルクを受けた上に、光の電磁場を介して相互作用することで全粒子が一体となり時計回り・反時計回りに回転させるための力も作用します。その後者の力が公転運動のためのトルクを変調していることが分かります。特に左円偏光は正の、右円偏光は負のスピンの角運動量を持っており、その符号の違いがトルクの増減に寄与しています。

トルクの計算結果は、複数粒子の場合に円偏光が粒子の公転運動を加減速しうること示しています。実際に、粒子の運動をシミュレーションした結果を図4に示しています。ここでは1個～24個までの粒子数に対する運動シミュレーションにおいて、全粒子の重心座標の公転運動の角速度の時間平均をプロットしたものです。それぞれ10回シミュレーションを行ってプロットしています。最初の2,3個の場合は違いが見えづらいですが、4個以上では左円偏光の方が右円偏光よりも速い公転運動を生じることが分かります。特に左円偏光でも右円偏光でも、特定の粒子数で角速度が最大となる条件が存在しますが、これは粒子数が変化することで、光に対する光学応答が変化し、共鳴的に強いトルクが粒子に作用した結果であると考えられます。更に、左円偏光は右円偏光よりも顕著に最大の角速度が速いですが、円偏光の違いによって粒子の配置が変化し、より強く光に応答した結果と考えられます。

図3：円偏光光渦の下で粒子に作用するトルク

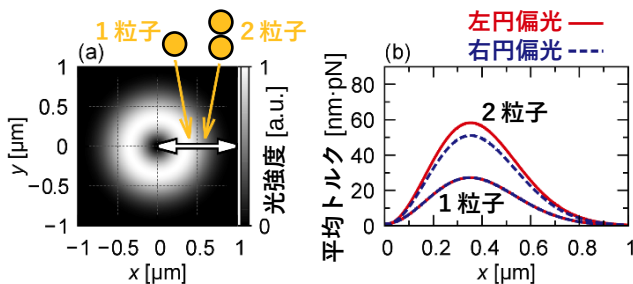
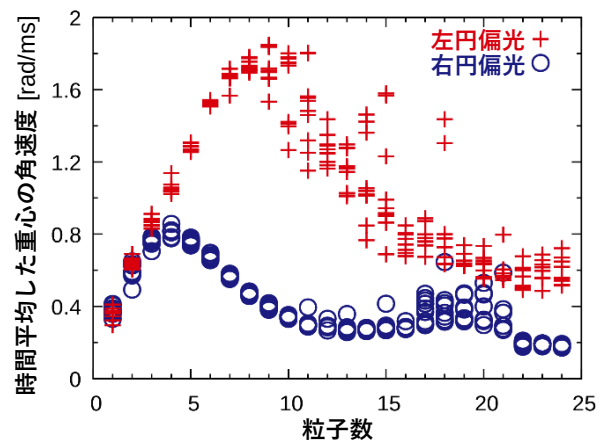


図4：粒子の公転運動の角速度



3. 今後への期待

今回の研究は、光操作技術におけるスピン角運動量の機能として、これまでに知られていなかったナノ粒子間の相互作用を介したスピン軌道相互作用の新原理を解明したものです。特に、粒子の運動の議論のみにとどまらず、スピン角運動量を持つ光の下での光学応答を議論する上で重要な知見となります。ま

【研究に関するお問い合わせ】 大阪府立大学 大学院理学系研究科/LAC-SYS 研究所 TEL:072-254-8132

特認助教 田村守 Mail: m-tamura [at] p.sosakafu-u.ac.jp、准教授・所長 飯田琢也 Mail: t-iida [at] p.sosakafu-u.ac.jp

千葉大学 大学院工学研究院/分子キラリティー研究センター 教授・センター長 尾松孝茂 Mail: omatsu [at] faculty.chiba-u.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。

報道発表資料 (5/ 5 ページ)

2019 年 7 月 5 日 (金) 14 時

た、金属のレーザー加工において、角運動量を転写することに成功した研究も報告されており、本論文の成果は光操作技術と融合した、より多彩なレーザー加工技術やナノ粒子を用いたバイオ分析技術の発展などへの貢献が期待されます。

4. 研究助成資金等

本研究は、文部科学省 科学研究費新学術研究領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」(JP16H06507(代表: 石原 一))、JST 未来社会創造事業 探索加速型「共通基盤」領域(JPMJMI18GA(代表: 飯田琢也))、科研費基盤研究 (A) (JP17H00856(代表: 飯田琢也), JP18H03884(代表: 尾松孝茂))、科研費基盤研究 (B) (JP18H03522(代表: 床波志保))、大阪府立大学キーププロジェクト(代表: 飯田琢也)、その他の支援を受けて完成しました。

5. 用語解説

解説1 光ピンセット: その名の通り、光でピンセットの様に小さな物質を摘む技術のことです。レーザー光をレンズで強く絞ると、強度が高くなる焦点付近に、ナノからマイクロサイズの物質を捕捉(トラップ)することができます。なお、光が物質に当たり散乱や吸収されると、運動量が物質に受け渡されることで物質を押す力が作用します。一般に、捕捉のための力を勾配力、散乱や吸収による力を散逸力と呼びますが、勾配力が散逸力を上回ることによって物質をトラップできます。

解説2 トルク: 物体を回転させる強さを示す値です。本研究では、粒子をビームの中心軸周りに公転運動させようとするトルクの値を評価しました。ビームの中心軸は原点を通過するように設定していますので、トルクは原点から粒子の位置までのベクトルと、粒子に作用する光の力のベクトルのクロス積で評価することができます。得られたトルクのベクトルの、ビームの進行方向の成分が、公転運動に寄与するトルクとなります。

解説3 偏光: 上述の通り、電磁波は電場と磁場が振動しながら伝わる波ですが、特定の方向に振動する性質を偏光と呼びます。 **図1**では直線偏光と、左右円偏光の例を示しました。古典的な円偏光の左右の定義は、光の伝搬方向の先に立ち(図では矢印の先)、奥から手前に飛んでくる光を特定の x-y 断面で観測する際に、電場の方向が反時計回りに回転するものを左円偏光、時計回りのものを右円偏光とします。特に重要な性質として、直線偏光と異なり、左右円偏光はスピン角運動量を持ちます。左円偏光が正の、右円偏光が負のスピン角運動量を持ち、その絶対値は等しくなります。直感的には、光子と呼ばれる光の粒が自転していると考えられます。

【研究に関するお問い合わせ】 大阪府立大学 大学院理学系研究科/LAC-SYS 研究所 TEL:072-254-8132

特認助教 田村守 Mail: m-tamura [at] p.sosakafu-u.ac.jp、准教授・所長 飯田琢也 Mail: t-iida [at] p.sosakafu-u.ac.jp

千葉大学 大学院工学研究院/分子キラリティー研究センター 教授・センター長 尾松孝茂 Mail: omatsu [at] faculty.chiba-u.jp

※ [at] の部分を@と差し替えてください。