

「同期現象」をデザインできる新しい理論的手法を開発 — 新たな光源や高効率な量子計算手法の開発に貢献 —

■ 研究成果のポイント ■

- ・ 様々な形の「同期現象」を自由にデザインして研究できる理論および手法を、世界で初めて開発した。
- ・ 誘電体球表面に分散した蛍光分子による発光現象に適用し、同期による大幅な効率増大を確認した。
- ・ 同期現象を自由にデザインできることで、新たな光源や高効率な量子計算手法の開発に貢献。

【研究概要】

大阪府立大学（学長：辻 洋）大学院工学研究科の余越 伸彦助教と石原 一教授（光物性理論・量子光工学）らによる研究グループは、「同期現象」研究のための新たな理論を開発しました。分子発光や量子計算の大幅な効率化に結びつく研究成果です。

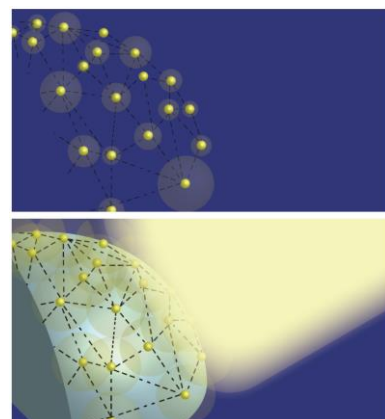
「同期現象」は蛍の集団発光現象や、細胞による体内時計など、身の回りの様々な現象として現れます。多数の要素が互いにリズムを合わせることで、単体にはない高度な機能を発現することが特徴ですが、本研究グループは振動体の空間配置や振動を伝える媒体の特性を取り入れることで、様々な形の「同期現象」を調べることができる理論を初めて開発しました。

研究グループは誘電体球表面に分散した蛍光分子に本理論を適用し、真空中では同期に達しないような低密度でも同期発光することを理論的に示しました。計算例では、同期により発光強度で約 100 倍、速度で約 200 倍もの増加が確認でき、高効率発光素子設計の新たな指針を与える成果となっています。

本研究で開発された理論は、他の様々な量子系にも適用が可能であり、新たな光源や高効率な量子計算手法の開発に結びつくと期待されます。

なお、本研究成果は、米国物理学会速報誌フィジカル・レビュー・レターズ『Physical Review Letters』に 5 月 18 日以降、オンライン掲載される予定です。

■ 論文タイトル：Synchronization dynamics in a designed open system（デザインされた開放系における同期ダイナミクス） 著者：余越伸彦、小田切和喜、石川陽、石原一



同期発光の概念図 上図：同期がない場合の個々の分子の発光。下図：全体が同期した場合の発光。

研究の詳細等については、別紙のとおりです。

別紙

1. 研究概要

17 世紀、オランダの科学者ホイヘンスは、2 脚の椅子の上に置かれた板から吊り下げられた 2 つの振り子時計を観察し、初めバラバラであった振り子のリズムが徐々に揃っていくことを発見しました。これは 2 つの振り子の運動が、板のごく僅かな振動を介して互いに影響を与え合うことで、そのリズムを揃えたと考えられます。このように、単純な個々の要素が互いにリズムを合わせることで、全体としての機能を発現することを同期現象と呼びます (図 1)。

同期現象は自然界の様々な場面で発現しています。例えば 1 本の木に多くの蛍が集まると、同じリズムで点滅して大きな光を発します。また生物の体内時計も、多くの細胞が協力して働く同期現象の一例です。比較的単純な要素から複雑な構造や機能を導き出す同期現象は、工学的にも広く応用されています。身近な所では、コンピューターのハードウェアがクロック同期により動作しており、超伝導素子^{*1} や超高周波回路^{*2} などの先端エンジニアリングにおいても同期現象は重要な役割を果たしています。

近年、多数の分子やナノスケールの物質構造 (以後、「ナノ物質」とします) を有機的に組み合わせることで、様々な機能を最大化または創出するという試みが盛んになっています。このような試みにおいても同期現象は大きな役割を持つことが期待されています。特定の機能を増強・創出するためには、ナノ物質の配置を含めた量子系全体をあらかじめデザインする必要があります。しかし、量子系全体の具体的な幾何学的構造や材料を想定して、同期現象を検証する理論的手法はこれまで確立されていませんでした。

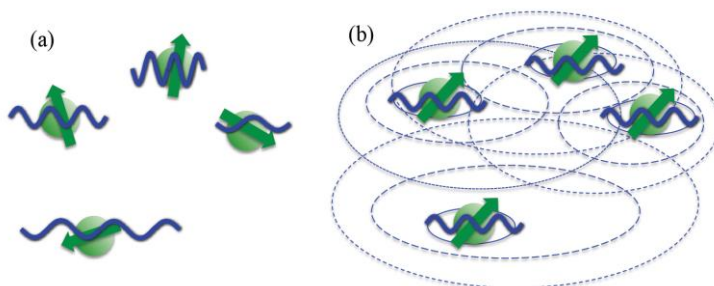


図 1 任意に空間配置をデザインされた振動子の振動が互いに伝達され同期的振動が生じるイメージ。同期した振動子が振動のリズムと方向を揃える。

2. 研究の成果

本研究の成果は、同期現象の発現に不可欠な媒体 (ホイヘンスの振り子なら板の振動に相当する) の影響を取り入れた理論的手法を確立したことです。この媒体による仲介者は一般に、ナノ物質間を伝搬する間に周囲の環境に依存して散乱・増強あるいは減衰をします。そして、その性質は同期現象の成否に大きな影響をもたらします。本研究では、媒体の性質をあらわに理論に組み込み、自由にデザインされた多体系の同期現象を理論的に調べることを可能にしました。

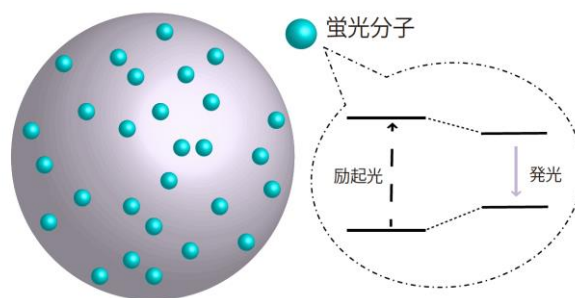


図 2 ポリスチレン球表面に分散した蛍光分子の模式図。蛍光分子はそれぞれ平均して $1 \mu\text{m}$ 以上離れており、その間隔は発光波長より長い。ポリスチレン球がない場合では同期現象を起こさない配置になっている。

また具体的な同期現象のデザインの一例として、半径数 μm の誘電体（ポリスチレン）球表面に分散した蛍光分子（図 2）の発光ダイナミクスについて数値的な模擬実験を行ないました。その結果、真空中では到底同期に達しないような分子数であっても、球によりデザインされた仲介者（ここではウィスパリングギャラリーモード^{※3} と呼ばれる球面の電場振動）を介して大きな同期発光が発現することを示しました（図 3、図 4）。同期を起こしていないときに比べ、この指向性のある同期発光は最大強度にして約 100 倍、発光速度にして約 200 倍に増加しており、新しいパルス光源として期待されます。

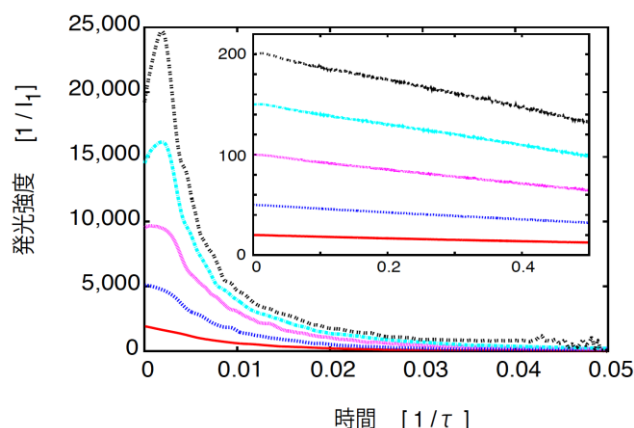


図 3 発光強度の時間依存性。縦軸と横軸は、それぞれ真空中の単一蛍光分子の発光強度 (I_1) と発光時間 (τ) を単位とした。発光の初期過程で、強度が大幅に増加しており同期を示している。分子数 20 個から 200 個の場合までを数値的に調べた。挿入図では、同じ密度でポリスチレン球を取り除いた場合のグラフであり、同期はほとんど起こらないことが分かる。

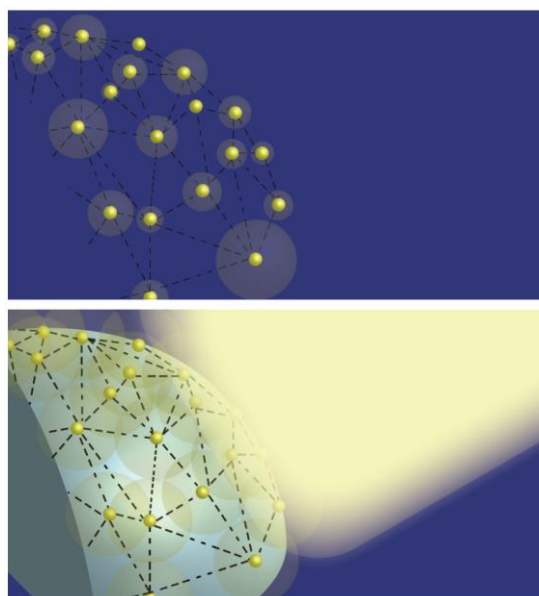


図 4 ポリスチレン球表面に分散した蛍光分子の同期発光のイメージ。上図はポリスチレン球による媒体がない場合の分子個々の発光。下図はポリスチレン球中のウィスパリングギャラリーモードに媒介され、分子が指向性のある同期発光をしている様子。

3. 今後の展開

本研究で確立された理論は、特殊な状況に当てはめれば同期現象の基本モデルとして著名な「蔵本モデル」を再現する一方で、さらに広範な同期の媒体を具体的に扱えるというメリットがあります。例えばビット間の同期現象を利用して量子計算^{※4}の効率化を実現でき、また結晶中において、磁化秩序や格子振動を媒体とした同期現象を発現することが出来れば、新しいナノエレクトロニクス素子開発に向けた大きな指針になります。

本研究は、多彩な量子多体系の同期現象をデザインすることで、IoT (Internet of Things) 社会の要請に応えるナノ量子工学の構築に結びついていくものと期待されます。

4. 研究助成資金等

本研究は、日本学術振興会科学研究費 新学術領域研究「光圧によるナノ物質操作と秩序の創生」(領域代表者 石原一 本学工学研究科 教授)、挑戦的萌芽研究「赤外太陽光-可視コヒーレント光直接変換機構の理論的実証」(研究代表者 石原一 本学工学研究科 教授)などの支援を受けて行われました。

5. 参考：用語の解説

※1 超伝導素子：

物質をある温度まで冷却したときに電気抵抗がゼロとなる現象を超伝導という。この超伝導の性質を利用した素子一般を超伝導素子と呼ぶ。例えば、超伝導体で誘電体を挟んだ素子に、外部からマイクロ波を同期させた際に現れる電流-電圧特性は電圧標準として利用されている。

※2 超高周波回路：

無線 LAN や Bluetooth、携帯電話などに利用される数 GHz～数十 GHz で動作する回路。特に無線周波数帯のひっ迫を解消するため、60GHz 帯の利用が近年注目されている。このような回路を安定動作させるためには、高い周波数安定性が求められ、基準信号源に位相同期する位相同期ループが広く用いられる。

※3 ウィスパリングギャラリーモード：

微小球(微小円柱)に入射された光は内部で全反射現象を繰り返し、ある条件で凹面を周回する。このときの共鳴振動をウィスパリングギャラリーモードという。イギリスの物理学者であるレイリー卿(ジョン・ウィリアム・ストラット)により、大聖堂のドーム壁周辺のささやきによる音響的效果として発見された。

※4 量子計算：

2つ以上の異なる状態を同時に合わせ持つ量子力学特有の性質をもった情報(量子ビット)を利用する計算。数千の量子ビットによるハードウェアが実現すると、現存のコンピューターでは実現し得ない大規模並列コンピューティングが可能となる。