

核磁気共鳴のレーザー検出器の小型化に成功

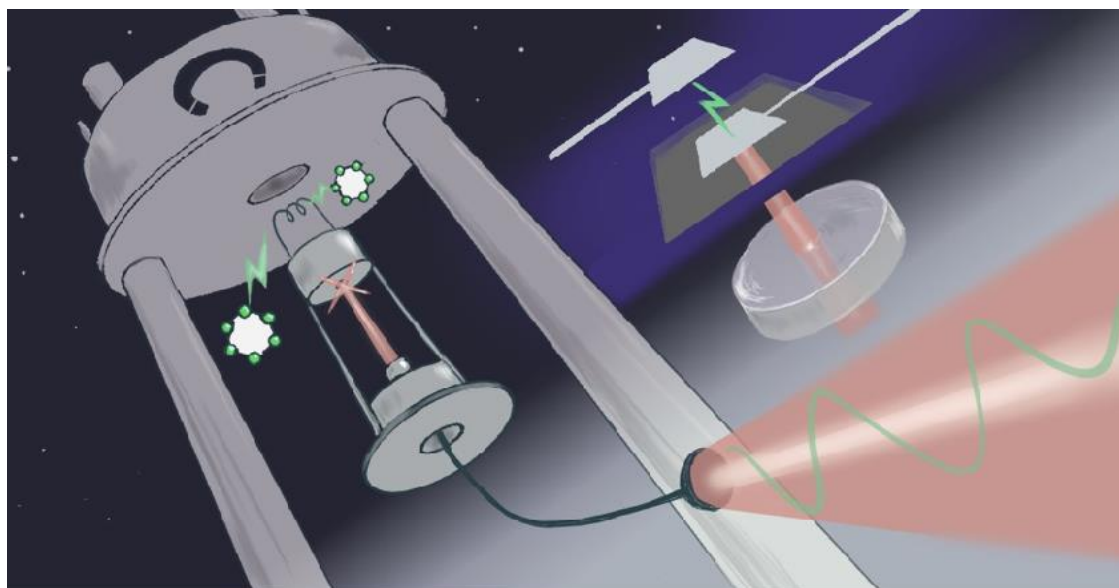
—量子技術による化学分析の道を開拓—

概要

京都大学大学院理学研究科 武田和行 准教授と富永雄介 同博士課程学生（研究当時、現：同特定研究員）の研究チームは、ハイブリッド量子技術を用いた核磁気共鳴法（Nuclear Magnetic Resonance; NMR）の光検出器を小型化し、超伝導磁場中で NMR 測定を行うことに成功しました。

現代の化学分析や医療において NMR は不可欠な手法ですが、原理的に感度が低く、NMR 信号検出における雑音を減らすことは今もなお重要な課題です。ここ数年、Electro-Mechano-Optical (EMO) NMR という、ハイブリッド量子技術を応用した検出方法による雑音の低減が期待されています。EMO NMR では NMR 信号の受信回路に薄膜が組み込まれており、微弱な NMR 信号によって振動するようになっています。その微小な振動をレーザー光の干渉によって低雑音にとらえます。しかし、安定な光学系を組むためには、大掛かりな光学定盤の上にシステムを構築するのが普通で、化学分析で用いるような NMR 装置がそなえる超伝導磁石に設置できるようなものは存在しませんでした。そこで、研究チームは、超伝導磁石の限られた内部スペースにぴったり収まる小型な EMO NMR 装置を設計・作製し、超伝導磁石内でベンゼンの炭素 13 の NMR 信号を取得することに成功しました。信号の取得には、二種類の原子核を揺さぶることで磁化を移し信号強度を補う、化学分析で広く用いられている手法も取り入れられました。この研究により、これまでは主として物理学的な観点から研究が行われてきた EMO NMR ですが、化学分析手法としての利用への道が開かれたと言えます。

本成果は、2022 年 3 月 23 日に Analyst 誌に掲載され、Analyst HOT Articles 2022 に選ばれました。



図：小型 EMO NMR 装置のイメージイラスト。超伝導磁石の筒状のスペースに差し込めるような、光検出器を設計・作製し、ベンゼンから発せられる電気的な NMR 信号を光に変換して取得した。装置の内部には薄膜が仕込まれており、NMR 信号を受信すると薄膜が振動して、それがさらに光に変換される仕組みになっている。

※この図は Royal Society of Chemistry の許可を得て次の文献をもとに掲載。

文献：Yusuke Tominaga and Kazuyuki Takeda, An electro-mechano-optical NMR probe for ^1H - ^{13}C double resonance in a superconducting magnet, Analyst (2022). DOI: 10.1039/D2AN00220E

1. 背景

物質の内部の構造やダイナミクスを知りたいとき、磁場中に置かれた物質に外部からラジオ波と呼ばれる電磁波⁽¹⁾を照射して、物質内部の核が持つ磁化(核スピン)を選択的に揺さぶることによって調べる方法があります。これを核磁気共鳴(Nuclear Magnetic Resonance; NMR)といいます。NMRは磁気共鳴画像法(MRI)⁽²⁾にも応用され、現代の化学分析や医療においても不可欠なものとなっています。しかしながら、NMRは原理的に感度が低いという、唯一の、しかしながら大きな欠点があり、NMRの感度向上は現在も重要な課題です。NMR信号を感度よく取得するためには、検出において混入する雑音を低減することが必要となります。

雑音を減らす検出方法として、Electro-Mechano-Optical (EMO) NMRというハイブリッド量子技術⁽³⁾を応用した新規手法に期待がかかっています。この方法では、窒化ケイ素薄膜を用いて、ラジオ波であるNMR信号を光に変換します。薄膜はNMR信号受信回路のキャパシタ⁽⁴⁾として組み込まれており、微弱なNMR信号を受信すると薄膜が振動するようになっています。薄膜の微小な振動を光の干渉によって低雑音でとらえることができ、NMRの高感度化につながると理論的に示唆されています。しかし、光学系を組むためには、大掛かりな光学定盤の上にレンズやミラーを固定して安定なシステムを構築するのが普通となっており、化学分析で用いられるNMR装置がそなえる、均一度の高い超伝導磁石の限られた内部空間に設置できるようなものは存在しませんでした。

2. 研究手法・成果

研究グループは、超伝導磁石の内部にぴったり収まる小型なEMO NMR装置を設計・作製しました。薄膜は空気の抵抗によって振動が減衰しないように、真空中に置くことが重要となります。その上で、電気的・光学的につながっていることが必要です。従来の方法では、一辺200 mmの立方体形の真空部屋を光学定盤の上に固定して実験を行なっていましたが、これらの要件を満たしながら、装置は持ち運び可能な直径60 mmの筒状の形状にまで小型化することができました。光の通路や形状を調整するためのレンズやミラーも鉛直方向に配列し、限られたスペースにうまく収まるようにしています。超伝導磁石の中で使うために、磁性体は極力使わずに組み立てました。

さらに、EMO NMRが化学分析に広く応用可能であることを示すために、二種類の原子核を揺さぶることで磁化を移し信号強度を補う、INEPT (Insensitive Nuclei Enhanced by Polarization Transfer) 法と呼ばれる化学分析で一般的に用いられている二重共鳴の手法を取り入れました。今回は、例としてベンゼンの水素原子核から炭素13原子核へ磁化を移し、炭素13のNMR信号を取得することに成功しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究により、これまでは主として物理学的な観点から研究が行われてきたEMO NMRですが、化学分析手法としての利用への道が開かれたと言えます。今後は、磁気共鳴画像法(MRI)などへの応用も期待されます。レーザー冷却⁽⁵⁾による薄膜振動の制御と組み合わせれば、さらに高度な検出も可能であると考えられます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(JST-CREST)(JPMJCR1873)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(MEXT Q-LEAP)(JPMXS0120330644)、日本学術振興会 科学研究費助成事業(18H04165)、日本学術振興会 特別研究員奨励費(20J14033)の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- 1) **電磁波**：電場と磁場が互いに作用しながら空間中を伝わる波。NMR では測定したい試料の周りに巻かれたコイルに交流電流を流すことで作られる。
- 2) **磁気共鳴画像法 (MRI)**：核磁気共鳴を原理に、人体の内部などの撮像をする手法。人体内の水素原子核の位置を見るので、水分量の多い脳などを診断するのに適している。
- 3) **ハイブリッド量子技術**：電気回路や光や機械的な振動子などの複数の量子系が相互作用することで、全体として一つの量子系としてみなせるような系をハイブリッド量子系といい、それを測定したり制御したりする技術のこと。
- 4) **キャパシタ**：電気を蓄えたり放出したりすることのできる電気回路の部品。コンデンサとも呼ばれる。金属板が平行に近接して向かい合った構造のものが代表的である。本研究ではこの金属部分を薄膜上に付けた特殊なキャパシタを作成して用いている。
- 5) **レーザー冷却**：機械振動子の特定の熱振動をレーザーによって制御して抑制すること。レーザー光と薄膜が強く相互作用すると、光の反射が薄膜の振動を抑制するように働かせることができる。

<研究者のコメント>

精密な計測装置が開発されて初めて重要な現象の発見につながった例は、過去のノーベル賞受賞研究を見ても多くあります。EMO NMR も今後新しい高感度な NMR 測定として、これまで知られていなかった物理・化学的な現象を見出すことにつながるかもしれません！（富永雄介）

<論文タイトルと著者>

タイトル：An electro-mechano-optical NMR probe for ^1H - ^{13}C double resonance in a superconducting magnet（超伝導磁石内での水素1—炭素13二重共鳴用の電気—機械—光結合 NMR プローブ）

著者：Yusuke Tominaga、Kazuyuki Takeda

掲載誌：Analyst DOI：10.1039/d2an00220e

<参考図表>

写真：作製した NMR 信号光検出装置を持つ富永（左）と武田（右）

