

量子ビットを超えて

ダイヤモンド量子センサーで暗黒物質探索を高精度化

本研究成果のストーリー

●Question

宇宙の物質の大部分を占めると考えられている暗黒物質（ダークマター）の正体は、現代科学における最大の謎の一つです。近年、ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）中心を利用したダイヤモンド量子センサーは、アクシオンなどの超軽量暗黒物質が生み出す極めて微弱な信号を検出する有力な手法として注目されています。しかし、これまでの手法ではダイヤモンド NV 中心が持つ潜在的な利点は十分に活用されていませんでした。

●Findings

ダイヤモンド NV 中心が持つ量子力学的性質を利用すると、現実的なノイズ環境下においても従来の方法を上回る測定精度が得られることを示しました。さらに、暗黒物質由来の信号に対する応答を増強すると同時に、環境由来の共通ノイズを抑制できる手法を採用しました。この手法をアクシオン暗黒物質探索に適用すれば、アクシオンの観測感度が、既存の方法と比較して最大で約 10 倍向上する可能性を示しました。

●Meaning

本研究は、多準位量子計測の一般原理を暗黒物質探索という具体的な課題へ応用できることを示しました。さらにこの手法は暗黒物質探索に限らず幅広い応用可能性を持っています。本成果は高次元量子センサーを用いて極めて微弱な基礎物理信号を探索する新たな研究方法を切り拓きます。



120文字
サマリー

ダイヤモンド量子センサーの量子力学的性質を最大限に活用することで、アクシオンなどの非常に軽い暗黒物質の探索感度を大幅に向上できることを示しました。極めて微弱な信号を捉える新たな手法は暗黒物質探索以外の分野へ発展していくと期待されます。

概要

いまだ正体が明らかになっていない暗黒物質（ダークマター）の観測のために、量子センサーが注目されています。特に、ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）中心を利用したダイヤモンド量子センサーは、暗黒物質候補であるアクシオンなどの軽い粒子が生み出す微弱な信号を検出する手法として有望ですが、これまでの検出手法では NV 中心の量子力学的な特徴は十分に活用されていませんでした。

本研究では、ダイヤモンド NV 中心のスピン三重項状態の三つの量子準位を「量子三準位系（qutrit）」として活用することで、従来法を上回る測定精度が得られることが明らかになりました。この手法をアクシオン暗黒物質探索に適用すれば、測定精度を高めることができ、アクシオンと電子の相互作用に対する感度が最大で約 10 倍向上する可能性を示しました。

これにより、高次元量子センサーを用いた極めて微弱な基礎物理信号の探索に、新たな道が切り拓かれます。

本研究は 2026 年 6 月に Physical Review A 誌の Letter として発表されました。

背景

暗黒物質は、私たちの銀河系を含む銀河の構造を支える上で不可欠な存在であるにもかかわらず、その正体はいまだ明らかになっていません。暗黒物質が物質に及ぼすわずかな影響を捉えるため、長年にわたり世界中で数多くの探索実験が行われてきました。

有力な候補として、アクシオンなどに代表される非常に軽い粒子が挙げられます。これらの粒子は電子よりもはるかに軽く、波のような状態として振る舞うと予測されています。そのため、精密な計測装置を用いることで、アクシオンがスピンに及ぼすことで起こる極めて微弱な振動信号を捉えられる可能性があります。

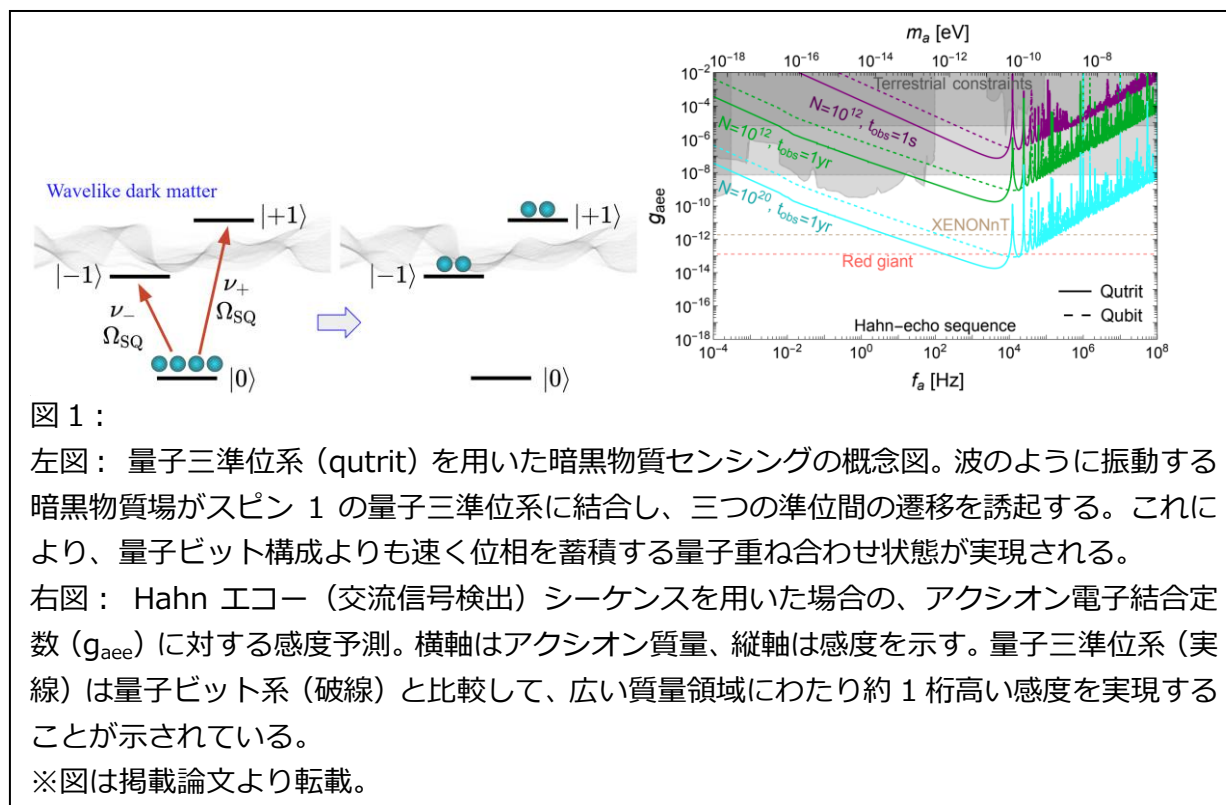
近年の量子技術の発展により、量子センサーはこのような微弱信号を検出する有力な手段として注目されています。中でもダイヤモンド中の電子スピンを利用するダイヤモンド量子センサーは、微小な磁場やスピンの変化を高感度で検出できます。ダイヤモンド量子センサーでは、ダイヤモンド結晶の中にある窒素空孔（NV）中心という特殊な欠陥の量子力学的な性質を使います。NV 中心は基底状態で 3 つの量子準位を持っており「量子三準位系（qutrit）」として動作可能です。しかし、これまで基礎物理探索への応用では主に 2 つの準位のみを使う量子ビットとしてのみ利用され、3 つの準位を扱えるという NV 中心の特徴は十分に活用されていませんでした。多準位量子系が量子計測において優位性を持つことは理論的には知られていましたが、実際のセンサーではノイズなどの影響下でもその利点を維持できる手法が必要でした。

今回の成果

今回、量子場計測システム国際拠点（WPI-QUP, KEK）と京都大学の理論・実験研究者からなる学際的研究チームは、高エネルギー物理学と量子センシングの知見を融合し、NV 中心が持つ三準位構造を活用することで超軽量暗黒物質探索の性能を向上できることを示しました。研究チームは、NV 中心の量子三準位を利用し、エネルギー差が最大となる二つの量子状態の重ね合わせを用いることで、現実のノイズ環境下でも十分な測定精度が得られることを示しました。この方法では、従来法と比較して外部からの微弱な信号によって量子状態に生じる変化の蓄積速度が 2 倍となります。これにより理想条件下では、量子状態が外部からの微小な変化をどれだ

け敏感に反映するかを表す指標である「量子フィッシャー情報」が 4 倍、信号振幅に対する感度が 2 倍向上します。さらに、量子三準位のうち二つの量子状態の組を比較する手法「二重量子 (double-quantum) センシング構成」を採用することで、暗黒物質由来の信号に対する応答を増強すると同時に、温度変動や電場揺らぎなどのノイズが抑制されるため、さらなる性能向上も期待できます。

研究チームは最適な量子計測プロトコルを理論的に導出し、その手法が量子力学的な精度限界に到達可能であることを示しました。さらにアクシオン暗黒物質探索へ適用した結果、アクシオンと電子の相互作用に対する感度が、従来の NV 量子ビット方式と比較して最大で約 10 倍向上する可能性を明らかにしました (図 1)。



QUP 主任研究員のヴォロディミル・タキストフ特任准教授 (Volodymyr Takhistov) は、次のように述べています。

「本研究は、多準位量子系が基礎科学にもたらす大きな可能性を示しています。量子力学的性質を活用することで、これまで検出が困難だった極めて微弱な信号を捉える新たな手法が実現できます。こうした考え方は暗黒物質探索にとどまらず、さまざまな分野へ発展していくと期待しています。私たちはまだ、量子センサーが自然界の根本法則の解明にどれほど貢献できるか、その可能性の入り口に立ったばかりです。」

今後の展開

本研究で確立された多準位量子系の量子計測方法の枠組みは、暗黒物質探索に限らず幅広い応用可能性を持っています。さらに、その基本原理はダイヤモンド NV 中心に特有のものではないため、他の多準位量子プラットフォームにも適用できると考えられます。高次元量子系は今後、多様な実験手法を通じて基礎物理学の精密検証を推進する新たな研究フロンティアとなることが期待されます。

研究グループ

本研究は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）量子場計測システム国際拠点（WPI-QUP）の主任研究員であり、KEK 素粒子原子核研究所（IPNS）理論センターの兼任研究員、ならびに東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）の客員研究員を務めるヴォロディミル・タキストフ特任准教授（Volodymyr Takhistov）が発案し、主導しました。

QUP のシャオリン・マ博士研究員（Xiaolin Ma）が、感度評価に関する主要な定量解析を担当しました。また、QUP の主任研究員であるエルンスト・デビッド・ヘルプシュレーブ特任准教授（Ernst David Herbschleb）が理論計算に貢献しました。

さらに、京都大学化学研究所および京都大学スピントロニクス学術連携研究教育センターの水落憲和教授と、ヘルプシュレーブ氏が、ダイヤモンド NV 中心を用いたセンシングの実験実装に関する専門的知見を提供しました。

研究プロジェクトについて

本研究は、高エネルギー加速器研究機構 量子場計測システム国際拠点において、文部科学省世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の支援を受けて行われました。また、部分的に日本学術振興会科研費（課題番号：23K13109）、文部科学省 Q-LEAP プログラム（JPMXS0118067395）の支援を受けて実施されました。

論文情報

題名: Beyond Qubits: Multilevel Quantum Sensing for Dark Matter

著者: Xiaolin Ma, Volodymyr Takhistov, Norikazu Mizuochi, Ernst David Herbschleb

掲載雑誌: Physical Review A (Letters)

<https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/zvzb-yv67>

DOI: 10.1103/zvzb-yv67