

Motivation どんな問題に取り組むのか？

量子コンピュータや量子情報システムは、高速な情報処理や高度な測定など、将来の情報化社会の基盤技術として期待されています。量子コンピュータを実現するためには、量子コヒーレンスと呼ばれる量子性を保持したまま制御する必要があり、壊れやすい量子の性質を守りながら制御するところに、その難しさがあります。本研究課題では、高い操作性を持たせながら、量子コンピュータに必要な機能を発現する量子情報デバイスを実験グループと共に設計し、それを元に量子コンピュータを作り上げる方法を理論的に明確にすることを目標としています。また、これによって、開発を目指す量子情報デバイスに必要とされる精度や、それに用いる材料の条件など、詳細にわたって理論的に検討し、量子情報システム創成に役立つ素子の開発を可能にします。

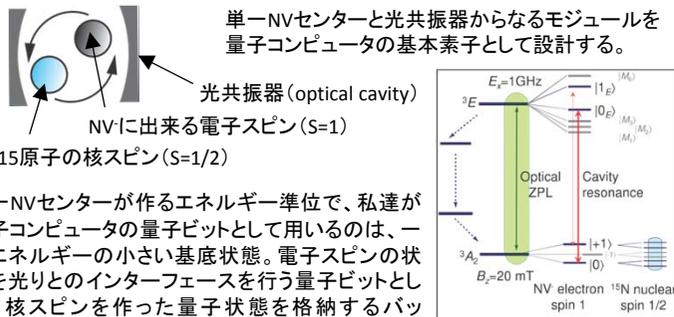
Originality and Impact 新規性とインパクトは？

量子コンピュータは、計算能力で従来のコンピュータの限界を大きく破ると期待されています。量子コンピュータの実現化上の難しさのひとつは、そのサイズにあります。例えば素因数分解でも、数が大きくなると解くのに時間がかかるように、同じ問題でも、問題の規模が大きくなると、コンピュータもそれに従って大きくする必要があります。必要に応じて、コンピュータを大きくできるシステムが、スケーラブルな量子コンピュータで最も標準的な性質を備えた量子コンピュータです。本研究課題ではスケーラブルな量子コンピュータを実現するために、ダイヤモンドを用いた素子の構成方法を、今日の技術レベルからみて達成可能な精度で提案することに初めて成功しました。また、この素子を用いた量子コンピュータの構成方法とその性能を示すことができ、実現化研究のゴールが明確化されました。

Design 量子コンピュータのための素子とは？

Architecture 量子コンピュータを構成する

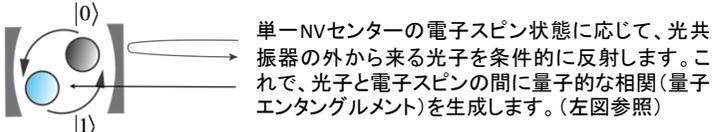
単一NVセンターを用いた量子モジュール



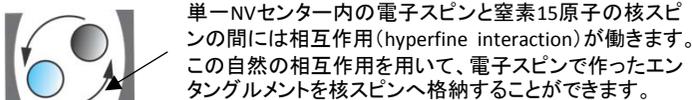
単一NVセンターのエネルギーレベル

単一NVセンターが作るエネルギー準位で、私達が量子コンピュータの量子ビットとして用いるのは、一番エネルギーの小さい基底状態。電子スピンの状態を光りとのインターフェースを行う量子ビットとして、核スピンを作った量子状態を格納するバッファとして用います。

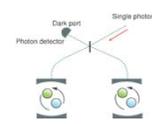
量子モジュールの機能(光とのインターフェース)



量子モジュールのメモリー機能



量子モジュール間の量子エンタングルメントを生成



電子スピンと光子のエンタングルメント生成から、これを2組用いて、2つの量子モジュールの電子スピン間にエンタングルメントを生成します。このエンタングルメント生成方法は、実現化上のノイズや損失を考慮し、安定して質の高いエンタングルメントを配信できるように設計しました。(左図参照)

このエンタングルメント配信方法は、スケーラブルな量子コンピュータの要請を満たすよう、高精度のエンタングルメントを配信できるため、配信の成功確率は最大でも12.5%とやや低め。これを克服するために、成功するまで繰り返します。成功したときには、それがわかるような仕組みになっています。(右図参照)



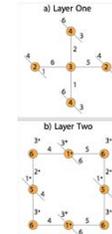
量子コンピュータ・モデル

量子モジュール間のエンタングルメント生成と、量子コンピュータとはどういう関係になっているのでしょうか。エンタングルメントは量子コンピュータには必要であることがわかっていますが、実際にどのように使っていくのでしょうか。本研究課題では、3次元トポロジカル量子計算モデルを用いて、量子コンピュータの構成します。このモデルでは量子モジュール間のエンタングルメントがまさに量子コンピュータの心臓部なのです。

3次元トポロジカル量子コンピュータの特徴は、量子誤り訂正と量子計算が一体となったところにあります。量子ビットが互いに規則正しくエンタングルした巨大なクラスター状態を量子コンピュータのリソースとして、量子計算を行います。

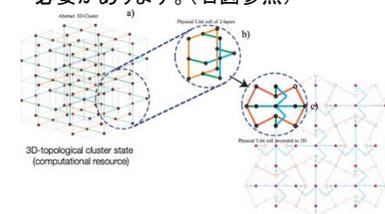
参考文献: Phys. Rev. X, K.Nemoto, et. al., 4, 031022 (2014) 本研究成果は、NTT物性科学基礎研究所、オーストリア工科大学とNIIの共同研究に基づきます。

量子コンピュータのリソース、クラスターを作る



モジュール間のエンタングルメントで気をつけなければならないことは2つ。ひとつは、エンタングルメント配信は簡単ではないので、量子コンピュータが大きくなるにしたがって、一つのモジュールがたくさんのモジュールとエンタングルメント配信しなくてはならないのは大変なことになってしまいます。3次元トポロジカル量子コンピュータではどんなにコンピュータが大きくなっても周りにある4つのモジュールのみとエンタングルメントすればよく、スケーラビリティを壊しません。(左図参照)

もうひとつは、となりのモジュールとエンタングルメントを配信しているときに、モジュール内の核スピンの保存している量子情報(量子状態)を壊してしまわないこと。これには設計上さまざまな仕組みを組み合わせることが必要で、制御ひとつひとつを精査し、ノイズや損失の影響を考えて設計する必要があります。(右図参照)



3次元クラスターの中で、物理層として必要なのは2層だけ。軸のひとつは時間軸なのです。この2層を順番にリサイクルすることで、3次元を擬2次元にすることができます。(左図参照)