

「電子・光子等の機能制御」  
平成11年度採択研究代表者

北川 勝浩

(大阪大学大学院基礎工学研究科 助教授)

## 「核スピンネットワーク量子コンピュータ」

### 1. 研究実施の概要

量子コンピュータは、0と1の重ね合わせを許す量子ビットの間で演算を行い、全ての可能性を並列に処理して、干渉によって正解を効率的に抽出する情報処理の新しいパラダイムである。その能力はビット数とともに指数的に発散するが、実験的にはまだ2ビットのものが誕生したばかりである。そこで、本研究では量子コンピュータの多ビット化を目指して、高分子や結晶の核スピンネットワークを用いた量子コンピュータと、それとは相補的な光子を用いた量子コンピュータの研究を、以下の通り行った。

#### I. 高分子量子コンピュータ

核スピンネットワークを用いて量子回路を構成し、量子コンピュータとして動作させるための基礎的な技術を確認することを目的として、小規模な分子を使った量子アルゴリズム実験と分子の探索、分子をプログラムするための量子コンパイラの試作、核スピンの制御に適したパルス波形の検討を行った。また、高分子を使った量子コンピュータの実現に必要な基礎的な知見を得ることを目的として、量子コンピュータに適した高分子の探索と高分子の核スピンネットワーク上のデータ転送・演算のシミュレーションを行った。

#### II. 結晶量子コンピュータ

山口・山本によるCePを使った結晶量子コンピュータの理論的提案の実現性を実験的に評価することを目的として、CePのNMR測定を行った。その結果、これまでに作成されたCePの試料ではNMR線幅が広すぎて量子計算に必要な十分に長い「量子もつれ状態」が確保できないことが分かった。また、緩和時間やESR個別励起などが過大評価になっていることを指摘した。実験的には試料の高純度化、理論的には緩和時間と個別励起の問題の解決が今後の課題である。

#### III. 光量子コンピュータ

単一量子事象が観測可能というユニークな特徴を持っている、線形光学素子量子計算の手法を、多光子とその相関をも取り扱えるように拡張し、量子誤り訂正などの単一事象の検出が本質的な量子アルゴリズムの直接的な検証実験を目指し

ている。今年度は、相関を持った多光子の発生に必要な励起用レーザーの選定・発注、および光子検出器の改良を行った。12年度は、相関を持った多光子の発生と高精度な検出に取り組む。

### 3. 研究実施内容

#### I. 高分子量子コンピュータ

##### (1) 核スピンネットワーク量子コンピュータの基礎

核スピンネットワークを用いて量子回路を構成し、量子コンピュータとして動作させるための基礎的な技術確立することを目的として、以下の研究を行った。

##### (1.1) 量子アルゴリズム実験と数qubitの分子の探索

###### (1.1.1) 量子離散フーリエ変換アルゴリズム

炭素13をエンリッチしたクロロホルム分子を使って、2-qubitの量子離散フーリエ変換の実験を行った。量子離散フーリエ変換の実験としては初めて初期化を行い、シミュレーションとよく一致する結果を得たが、量子トモグラフィによる出力状態の同定が課題として残った。

###### (1.1.2) Deutsch-Joszaアルゴリズム

次に述べるプロトリフルオロブテン分子を3-qubitの量子コンピュータとして動作させて、Deutsch-Joszaアルゴリズムの実験を行い、アルゴリズムに改良の余地があることを見出した。

###### (1.1.3) 数qubitの分子の探索

従来の3-qubitを超える実験を目指して分子の探索を行い、そのまま3-qubit、炭素13をエンリッチすれば5-qubit、さらに原子の置換によって最大11-qubitまで可能性のある分子として、プロトリフルオロブテンを見出した。

##### (1.2) 量子コンパイラの研究

多ビットの核スピンネットワーク量子コンピュータを効率的にプログラムすることを目的として、任意のユニタリー変換をNMRで直接実現可能な基本量子ゲートだけを使った量子回路に分解する量子コンパイラを試作した。より簡素な量子回路を生成するアルゴリズムの考案が今後の課題である。

##### (1.3) 帯域選択パルスの研究

核スピンネットワーク量子コンピュータの制御に適した帯域選択パルスの検討を行った。

##### (2) 高分子量子コンピュータの基礎

高分子を使った量子コンピュータの実現に必要な基礎的な知見を得ることを

目的として以下の研究を行った。

(2.1) 量子コンピュータに適した高分子の探索

(ABC)<sub>n</sub>構造をもつ高分子を探索し、ポリペプチドとポリイソプレンを見出した。

(2.2) 高分子の核スピンネットワークを用いた量子ゲート・量子回路構成法の基礎

(ABC)<sub>n</sub>構造をもつ核スピンネットワーク上でのデータ転送、演算のシミュレーションを行った。

#### ・結晶量子コンピュータ

NMR量子コンピュータは適度に長い緩和時間を持った量子ビットの集積化が他の方法より容易であると考えられていることから注目を集めている。このような状況において希土類化合物CePを素子としたNMR量子コンピュータがYamaguchi-Yamamoto (以下Y-Y) によって提案された。本研究の目的は、この理論的提案を実験的な観点から評価することである。

CePは核スピンを持たない唯一の磁性原子Ceと、核スピン1/2をもつPによって構成されており、かつ、NaCl型の単純な結晶構造をとることからNMR量子コンピュータ素子として格好の化合物とされている。

Y-Yの提案によるとCePを用いたNMR量子コンピュータの実現にはNMR線幅は1 kHz程度以下である必要があるとされている。あいにく、これまでCePのNMR線幅に関する実験的な報告は行われていない。このようなことから、本研究では現在までに作成されたCeP試料のNMR線幅が量子コンピュータ素子としての条件を満たしているかを評価するためにFT-NMRによるP核の線幅の測定を行った。

図1は6.3 Tでの粉末CePに対するFT-NMRスペクトルを示す。このようなスペクトルを単結晶および粉末CePに対して測定することにより、NMRスペクトル線幅の外部磁場依存性を得た。また、非磁性参照物質である単結晶LaPに対しても同様の測定を行った。それらの結果を図2に示す。

核スピン双極子磁場によるNMR線幅はスペクトルの分散値(2次モーメント)として厳密に算出できる。それによるとCePに対しては半値全幅(FWHM)は1.3 kHz、LaPに対しては3.0 kHzと見積もられる。CePに対する実験値はこれらの値より1桁以上も大きく、その原因として磁性不純物や試料の不均一性が考えられる。

また、線幅以外にもY-Yの提案では以下の2点を過大評価しているために量子計算の実際の動作には問題点があることを指摘した。①スピン格子緩和時間の見積もり、②ESRによる磁性スピンの個別励起。量子コンピュータの実現にはこれらの問題点を解消する必要がある。したがって、今後のNMR量子コンピュータの開発に向けて、試料の高純度化を進めるとともに、これらの問題点を解消した新た

な提案が求められる。

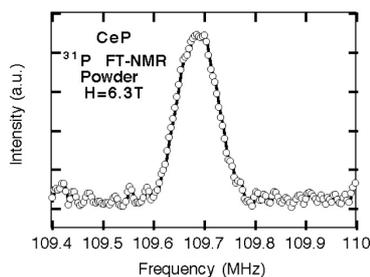


図1 P核のFT-NMRスペクトルの一例

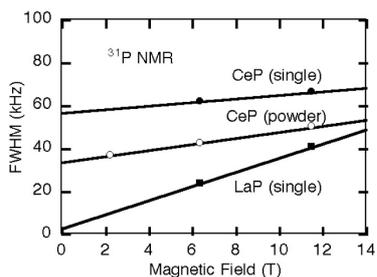


図2 P核NMRスペクトルの半値全幅の外部磁場依存

・光量子コンピュータ

(1) 励起用レーザーの選定・発注

多光子間に相関を持たせ、量子回路を実現する方法として、我々は同時に発生した多光子対と、それらに対するベル測定を用いる方法を提案してきた(図3)。

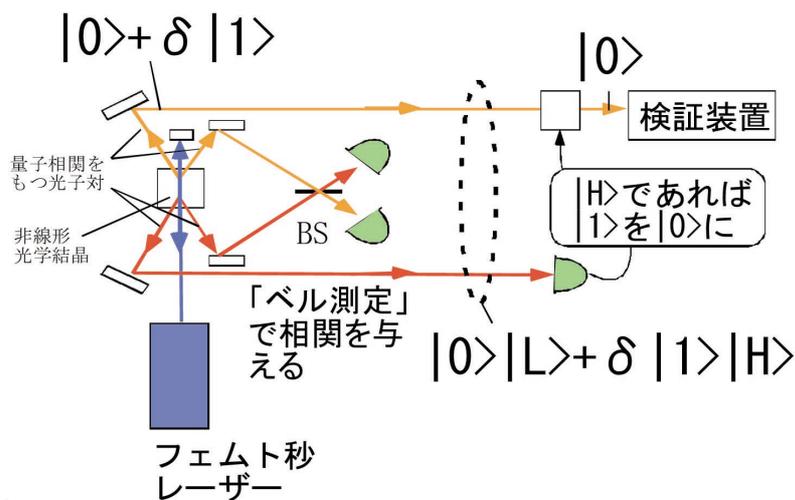


図3 : ベル測定を用いた量子誤り訂正実験。励起用のフェムト秒レーザーからの紫外のポンプ光によって、非線形光学結晶において同時に光子対が発生する。それぞれ光子対の内一つづつの光子間でベル測定を行うことで、新たな「相関をもった光子対」を生み出すことが出来る。

ただしこの方法では、光子対同士は、それぞれ無関係に発生する為、「同時」に多くの光子が発生する確率が低く、実験時間が長時間になることが不可避である。このため、今回励起用レーザーとして、固体レーザー励起でかつ紫外への変換結晶を特別に長くすることで、長時間安定性とパルスあたりの高いパワーをもつものを選定した。

(2) 光子検出器の改良

上記のような方法で「相関を持った光子対」を生み出す為には、ベル測定に用いる検出器として、光子の入射だけでなく、入射した光子数をも観測出来る検出器が必要である。我々はすでにそのような検出システムとして、Visible Light Photon Counterという検出デバイスをダークカウントを除去する為に完全に外部からの赤外線をシールドし、6 Kの温度で作動させるものを構築していたが、装置としての再現性に乏しかった。今年度は、定常的に実験が可能であるように、赤外線シールド等の徹底的な見直しと改良を行った。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

K.Hashi, T.Shimizu, A.Goto, H.Kitazawa, G.Kido, T.Suzuki,  
"Experimental aspects of an NMR computer with CeP"  
Applied Physics A 70 (2000) 359-360