

「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(qubit)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 qubit の数とともに指数的に増大するが、実験的にはまだ数 qubit のものが誕生したばかりである。そこで、本研究では高分子や結晶の核スピンネットワークを用いた多 qubit 量子コンピュータの実現を目指して、以下の研究を行った。

#### I. 分子量子コンピュータ

「核スピン量子コンピュータは本当に量子計算機と言えるのか？」という我々のプロジェクトにとって本質的な疑問に対して、それが初期化の問題に帰着されることを示し、典型系列による情報理論的考察に基づいて、真の量子計算を行うための初期化法を考案した。さらに、擬似的な極低温状態を用いてこの初期化法の実験を行った。今後は、実際にスピン偏極によって極低温状態を実現し、そこからこの初期化法を用いて真の量子計算を目指す。

外乱に強いと期待される非断熱的な幾何学的位相を用いた量子ゲートの動作速度と残留する動的位相の間にトレードオフがあることを実験的に見出し、理論的にも明らかにした。

#### II. 核スピン偏極の基礎研究

量子コンピュータの初期化と NMR 分光の飛躍的感度増大のための核スピン偏極技術を確立することを目的として、主にペンタセンをドーブしたナフタレンで基礎研究を行った。低磁場で偏極させた核スピンを高磁場中に移動して観測することによって、炭素 13 の NMR 信号を一桁高い分解能で観測することに成功した。また、粉末試料での最適条件を考察し、電子スピン共鳴スペクトルのピーク近傍だけを掃引することにより、偏極したプロトンの観測に成功した。

#### III. 結晶量子コンピュータ

結晶あるいは固体およびその表面などの核スピンを用いた量子コンピュータの実現に必要な材料と NMR 技術の研究・開発を行った。本年度は、特に、21.6T(プロトンに対して 920MHz)と世界最高の超高磁場超伝導マグネットを用いた NMR 装置の開発を行い、高分解測定を行った。今後は、この NMR 装置を用いて高感度・高分解の固体 NMR 量子コンピュータの研究を行う。

#### IV. 光量子コンピュータ

線形光学素子量子計算の手法を、量子テレポーテーションの技術を応用することで多光子とその相関をも取り扱えるように拡張し、単一事象の検出が本質的な量子アルゴリズム(量子誤り訂正など)の検証実験を目指している。今年度は、引き続き高い忠実度をもつ量子テレポーテーション実験のより詳細な条件解析を行うとともに、線形光学素子のみを用いた量子位相ゲートを新規に考案した。

#### V. 量子コンピュータ理論

量子コンピュータ実験を理論的に基礎づけることを目的として、以下の結果を得た。測定精度と擾乱の正しい関係を明らかにした。保存量と非可換な物理量の測定精度の関係から、測定には巨視的な制御部分が必要であることを示した。今後は、これを用いて量子ゲートに必要な巨視性の定量化を行う。確率振幅を非常に限定した量子計算モデルの能力を評価した。

### 2. 研究実施内容

#### I. 分子量子コンピュータ

核スピンを用いた量子コンピュータを、予想されている 10-qubit の限界をクリアして多ビット化することを目的とし、当初より初期化に着目して研究を行ってきた。一方、NMRを使った従来の実験では、エンタングルメントが存在しないことや、実験回数や分子の数などの物理的資源が qubit 数とともに指数的に爆発することから、本当に量子計算と言えるのかという疑問や批判もあった。そこで、これらの問題が全て初期化の問題に帰着されることを示し、従来の方法の限界を明らかにするとともに、真の量子計算を行うための初期化法を理論的に提案し、原理確認の実験を行った。

従来の方法は、単独の初期状態の分子からの信号のみを抽出していたが、これでは qubit 数とともに指数的に確率が小さくなり、必要な分子=量子コンピュータの数が指数爆発することは原理的に避けられない。そこで、典型系列に基づく情報理論的考察を行い、データ圧縮の原理を逆に用いて多くの異なる初期状態の分子から縮退した信号を得ることによって、qubit 数が増加しても分子の数が指数爆発しない真の量子計算が可能であることを示した。これは、まず物理的にスピンを極低温に冷却し、そこからさらにソフトウェア的な圧縮を行うことによって可能となる。そのことをデモンストレーションするために、4-qubit の分子を従来の方法で擬似的な極低温状態にし、そこからデータ圧縮回路によって 2-qubit の初期化を行った。将来的には、核スピン偏極によって実際に核スピンを極低温に冷やした状態から実験を行う計画である。

また、外乱に強く、かつ、動作速度を犠牲にしない量子ゲートの可能性を追求して、非断熱的な幾何学的位相を用いた量子ゲートの実験を系統的に行った。その結果、動作速度を上げると残留する動的位相の割合が増加するトレードオフが明らかになり、それを裏付ける理論的結果も得た。

#### II. 核スピン偏極の基礎研究

三重項電子スピンの分極を核スピんに交差分極で移すには低磁場で実験せざるを得ないが、NMR 信号を観測するには高磁場の方が分解能が高い。そこで、低磁場 (0.3 T) で核偏極させた試料を高磁場 (4.7 T) 中に移動して NMR 信号を観測する試みを行った。pentacene-doped

naphthalene 中の  $^{13}\text{C}$  スピンの NMR 信号を、低磁場で電子スピンからプロトンスピンへ、さらに高磁場でプロトンスピンから  $^{13}\text{C}$  スピンへ交差分極で移すことにより、一桁高い分解能で観測することに成功した。

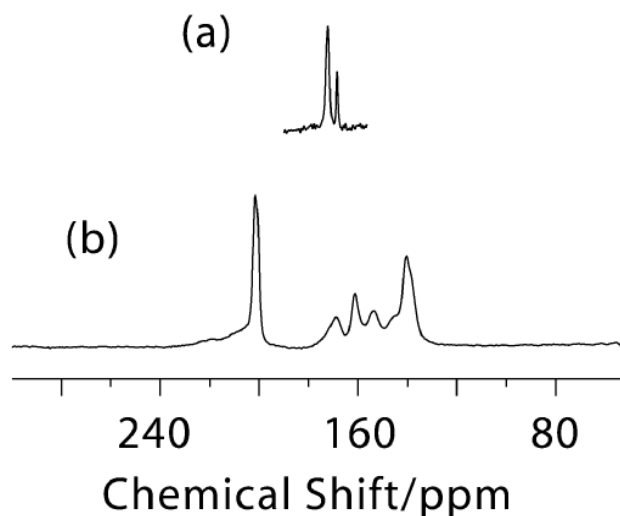
これまで報告されている、光励起三重項状態の電子スピンを用いた DNP はすべて単結晶を用いて行われている。しかし、もしこの方法が粉末試料に拡張できれば、応用範囲が極めて広がる。そこで粉末試料に

おける DNP を可能にする方法および最適条件を探った。ゼロ磁場分裂相互作用により極めて広い ESR の粉末スペクトルのピーク辺りだけをスイープすることにより、ペンタセンをドーブしたナフタレンおよび重水素化ナフタレンでプロトンの DNP 信号を観測することに成功した。

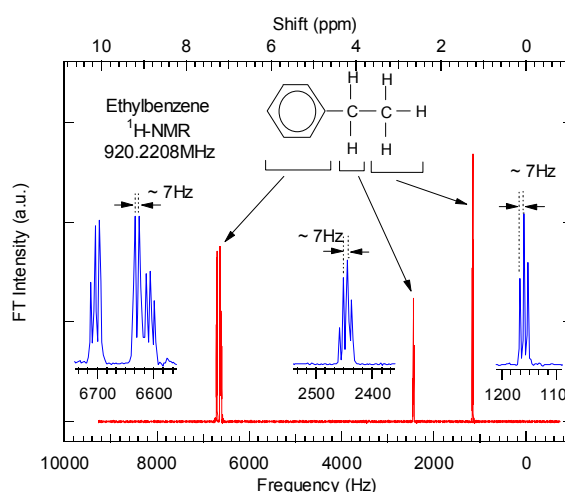
### III. 結晶量子コンピュータ

現在実験されている溶液分子の NMR に対して、固体 NMR は多ビット化に向けた正攻法ではあるが、初期化・高感度化など克服すべき技術的課題がある。一般に、NMR の感度・分解能は、測定磁場が高ければ高いほど向上するため、強磁場化は NMR の高感度化・高分解能化を進める方法の1つである。近年の超伝導線材の改良などにより 21.6T (水素核に対して 920MHz) と世界最高磁場を発生することができる超伝導磁石が物質・材料研究機構と(株)神戸製鋼によって共同開発された。本年度は固体 NMR 量子コンピュータの実現に向け、NMR の高感度化・高分解能化をはかる方法の一つとして、この超伝導磁石を用いた強磁場 NMR の技術開発を行い、920MHz においてエチルベンゼンの高分解能 NMR 測定を行った。

今回開発を行ったものは分光計・プ



(a)  $^{13}\text{C}$  NMR spectrum of a single crystal sample of pentacene-doped *p*-terphenyl measured in 0.3 T. (b)  $^{13}\text{C}$  NMR spectrum of a single crystal sample of pentacene-doped naphthalene measured in 4.7 T. The NMR frequencies are 3.4 and 50 MHz for (a) and (b), respectively.



920MHzで測定したエチルベンゼンのプロトン NMR スペクトル。高分解能 NMR の特徴であるスペクトルの超微細分裂が現れている。

ローブ・室温シムである。分光計は全て固体素子化され 500MHz から 1GHz までをカバーしている。プローブは19チャンネルの固体用マトリックス型室温シムと一体型とした。試料は標準試料としてエチルベンゼンを選び、シングルショットの信号を観測した。図にエチルベンゼンの FT-NMR スペクトルを示す。ベンゼン環およびエチル基に対応する明瞭なシグナルがでている。このほかドリフトの測定なども行った。その結果、この超伝導磁石および超伝導シムは高分解能 NMR 磁石として十分に高い完成度に達していることが明らかとなった。今後、この超伝導磁石を用いた強磁場高分解能 NMR により、固体 NMR 量子コンピュータの研究を進めて行く。

#### IV. 光量子コンピュータ

線形光学素子量子計算の手法を、量子テレポーテーションの技術を応用することで多光子とその相関をも取り扱えるように拡張し、単一事象の検出が本質的な量子アルゴリズム(量子誤り訂正など)の検証実験を目指している。今年度は、引き続き高い忠実度をもつ量子テレポーテーション実験のより詳細な条件解析を行うとともに、線形光学素子のみを用いた量子位相ゲートを新規に考案した。

- ・ 線形光学素子のみを用いた量子位相ゲートを新規に考案

今回、あらたに線形光学素子を用いて量子位相ゲートを構成する方法を考案した(PRL に投稿中)。この方法の特徴は、2001 年に Knill, Laflamme, Milburn によって提案された方法よりもさらに簡略であり、かつ効率も高い。また検出段階以外では「光子数検出器」を必要としないというさまざまな利点を有する。またそれと並んで、あるもつれあい状態の光子のみを透過するフィルターについても発案した(Hofmann and Takeuchi, PRL に掲載)。

- ・ 量子テレポーテーション実験の忠実度の研究

H12 年度においては、パラメトリック蛍光対として完全に純粋にもつれ合った状態が得られる場合について量子テレポーテーションの忠実度を解析したが、今年度はさらに得られる光子対が混合状態にある場合について研究を進めた。その結果、一般に実験で得られる90%程度の明暗比(Visibility)の光源を用いた場合においても十分に、量子的にしか実現できない2/3以上の忠実度を達成できることが分かった。

#### V. 量子コンピュータ理論

測定精度と擾乱に関する正しい関係を明らかにする目的で、次の成果を得た。質点の位置を測定するためのハミルトニアン・モデルを構成して、その測定によれば、測定値の確率分布が測定直前の波動関数から得られる位置の確率分布を正確に再現するにもかかわらず、測定直前に運動量状態にある質点を乱すことなく測定が可能であることを示した。このことから、位置測定の精度と運動量の擾乱の大きさの積は常にプランク定数程度以上であるという不確定性原理の解釈は正しくなく、正しい関係においては精度と擾乱の積の下限が入力状態における位置と運動量の不確定性とも関わっていることが示唆される。一方、Wigner-Araki-Yanase の定理を定量化して、保存量と非可換な物理量の測定精度の下限が、測定器に含まれる保存量の不確定性に反比例することを示した。このことは、測定相互作用には巨視的な制御部分が含まれることが不可避であることを示している。量子ゲートの物理的実現にもそのような巨視性が精度と関わるということが予想されていた

が、その定量化への道が開かれた。

量子計算量クラスを定義する上で、使用できる振幅を可能な限り制限することは、量子計算量クラスの研究を行いやすくする上で重要であり、BQP や NQP といったクラスに対しては集合  $A=\{0,3/5,4/5,+1,-1\}$  や集合  $B=\{0,1/\sqrt{2},1,-1\}$  に制限しても問題ないことが示されている。この問題を計算量クラス EQP および ZQP に対して研究して、EQP に対しては集合 A からの確率振幅を用いた量子チューリング機械は、決定性チューリング機械と同等の能力しか持ち得ないことを示した。さらに、より一般的な結果として、任意の有理数の偏りを持つ量子コイン付の計算機も決定性チューリング機械と同等の能力しか持ち得ないことを示した。次に ZQP に対しては、集合 A からの確率振幅を用いた量子チューリング機械は、整数の素因数分解問題を効率的に解くことが可能であることを示した。その一方で、集合 B は ZQP を定義する量子チューリング機械の確率振幅として集合 A より強力であることを示した。なお、上記の結果は量子チューリング機械に限らず、量子回路や量子通信型計算モデルにも適用可能である。

### 3. 研究実施体制

#### (1) 分子量子コンピュータ研究グループ

① グループ長 北川 勝浩（大阪大学大学院基礎工学研究科 助教授）

#### ② 研究項目

- ・ 初期化理論
- ・ 溶液分子初期化基礎実験
- ・ NMR 量子回路実験
- ・ 分子探索

#### (2) 核スピン偏極基礎研究グループ

① グループ長 寺尾 武彦（京都大学大学院理学研究科 教授）

#### ② 研究項目

- ・ 低磁場で偏極した核スピンの NMR の高磁場観測
- ・ 粉末試料における DNP

#### (3) 結晶量子コンピュータ研究グループ

① グループ長 清水 禎（物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所 研究室長）

#### ② 研究項目

- ・ 結晶量子コンピュータ材料開発
- ・ 結晶量子コンピュータの物性的基礎
- ・ NMR 技術開発(初期化・高感度化)

#### (4) 光量子コンピュータ研究グループ

① グループ長 竹内 繁樹（北海道大学電子科学研究所 助教授）

#### ② 研究項目

- ・ 線形光学素子のみを用いた量子位相ゲートの考案

- ・ 量子テレポーテーション実験の忠実度の研究

(5) 量子コンピュータ理論研究グループ

① グループ長 小澤 正直 (東北大学大学院情報科学研究科 教授)

② 研究項目

- ・ 量子 Turing 機械と一様量子回路族の量子計算量の比較
- ・ 量子サブルーチン問題と量子計算量クラスのロバスト性
- ・ 通信型量子計算モデルを用いたエンタングルメントの有用性の解析
- ・ 一般化量子測定における測定精度・擾乱・情報量・エンタングルメントの相互関係

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- 北川勝浩, 分子で作る量子コンピュータ, 科学と工業第 54 巻第 4 号, 459-462 (2001)
- A.Goto, T.Shimizu, R.Miyabe, K.Hashi, H.Kitazawa, G.Kido, K.Shimamura, T.Fukuda, Investigation for nuclear-spin couplings in the lithium fluorides as possible candidates for crystal nuclear magnetic resonance quantum computing devices, Appl.Phys.A74, 73-77 (2001)
- M.Ozawa, Controlling quantum state reduction, Phys.Lett.A282, 336-342 (2001)
- 北川勝浩, NMR 量子コンピュータの近況, 数理科学 456 巻 6 月号, 56-63 (2001)
- 竹内繁樹, 量子計算, 量子情報通信の未来と展望, 数理科学 456 巻 6 月号, 64-71 (2001)
- 竹内繁樹, 量子計算ってなに?, システム/制御/情報 45 巻 6 号, 351-352 (2001)
- S.Takeuchi, Beam like twin photon generation using type-II parametric down conversion, OpticsLetters26 巻 11 号, 843-845 (2001)
- M.Ozawa, Quantum measurement, information, and completely positive maps, QUANTUM COMMUNICATION, COMPUTING, AND MEASUREMENT 3, 97-106 (2001)
- D.Ulam-Orgikh and M.Kitagawa, SPIN SQUEEZING AND DECOHERENCE LIMIT IN RAMSEY SPECTROSCOPY — Even sub-optimal entanglement can achieve absolute improvement —, QUANTUM COMMUNICATION, COMPUTING, AND MEASUREMENT 3, 453-456 (2001)
- K.Takeda, K.Takegoshi, and T.Terao, Dynamic Nuclear Polarization by Photoexcited-Triplet Electron Spins in Polycrystalline Samples, Chem.Phys.Lett.345(1-2), 166-170 (2001)
- D.Ulam-Orgikh and M.Kitagawa, Spin squeezing and decoherence limit in Ramsey spectroscopy, Phys.Rev.A64, 052106(1-6) (2001)
- S.Takeuchi, A Simple Quantum Computer: Experimental Realization of Quantum Computation Algorithms with Linear Optics, Electronics and Communications in Japan vol.84 Issue11, 52-60 (2001)

- 竹内繁樹, 量子情報デバイスとナノテクノロジー, 機能材料第 22 巻第 1 号, 44-51 (2002)
  - K.Hashi, T.Shimizu, T.Kiyoshi, A.Goto, S.Matsumoto, H.Wada, K.Hasegawa, T.Fujito, M.Yoshikawa, T.Miki, S.Ito, Observation of a High Resolution Proton NMR with a 920MHz Superconducting Magnet, Chem.Lett. No.3, 370-371 (2002)
  - M.Ozawa, Conservation laws, uncertainty relations, and quantum limits of measurements, Phys.Rev.Lett.88, 050402(1-4) (2002)
  - H.Nishimura, On quantum computation with some restricted amplitudes, Lecture Notes in Computer Science 2285, 311-322 (2002)
- (2) 特許出願  
国内1件、外国なし