

「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 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

核スピンネットワークによる真の量子計算の実現とその多qubit化のために、物理的および情動的初期化、量子回路、物質材料、量子計算理論、および、相補的な関係にある光量子コンピュータの研究を行った。

予備圧縮と数え上げ符号に基づく効率的な初期化アルゴリズムを考案し、そこで重要な役割を果たす量子フーリエ変換に基づく桁上げbit不要の加算回路の動作を始めて実験的に検証した。

光マイクロ波誘導核偏極による物理的初期化の基礎技術を確立し、量子コンピュータに適用するための拡張を行うとともに、NMR分光の飛躍的感度増強による基礎科学への貢献をめざして、偏極機構の解明とレーザー光透過に関する研究を行った。さらに、低磁場で偏極した核スピンの高磁場観測を行うとともに、従来よりも高速な偏極が期待されるペンタセンをドーピングしたp-テルフェニルについて研究を行った。

結晶あるいは固体およびその表面の核スピンを用いた量子コンピュータの実現を目標として、光ポンピングによる核偏極を実現し、また、新しい量子演算機構を提案した。

量子誤り訂正など単一事象の検出が本質的な量子アルゴリズムの実験的検証を目指して、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、多光子間もつれ合いを実験的に検証した。さらに、線形光学素子のみを用いた量子位相ゲートの実験系の設計を行った。

核スピンネットワーク量子コンピュータ及び光量子コンピュータの実験を理論的に基礎づけることを目的として、量子情報、量子計算、量子測定の実験的研究を行った。

2. 研究実施内容

分子量子コンピュータ研究グループ

a) 核スピン量子コンピュータの効率的な初期化アルゴリズム

核スピン偏極による物理的初期化の後でも、核スピンの状態はまだ多くの典型状態の混合であり、純粋状態には程遠い。そこで、情報圧縮の原理を用いて、状態の違いを一部のqubitに圧縮し、残りの部分を共通の初期化された状態として量子計算に用いることを

考える。指数的な資源を使わない真の量子計算を実現するには、この圧縮アルゴリズムが qubit数 n の多項式の計算量でなければならない。さらに、初期化アルゴリズムは、既に初期化されたクリーンな作業領域を使うことはできない。また、核スピンの場合、測定を用いることができない。そこで、これらの条件を全て満たす効率的な初期化アルゴリズムを考案した。

まず、最も基本的なアイデアとして、 $\log n$ qubitの初期化は、たとえ指数オーダーの悪いアルゴリズムでも n の多項式しかかからないことに着目した。予備圧縮によって $\log n$ を初期化し、それを作業領域として本格的な圧縮アルゴリズムで残りの領域を初期化する。 $\log n$ の作業領域で動作する圧縮アルゴリズムとして、数え上げ符号に桁上げbitが不要な量子フーリエ変換ベースの加算回路を用いたものと、数え上げ符号自体の演算精度を $\log n$ に落としたものを考案した。さらに、これらを予備圧縮に再帰的に適用すると、計算量は $O(n^2(\log n)^2)$, $O(n^2 \log n)$ まで節約可能であることを見出した。また、これらの量子回路設計とシミュレーションを行った。

b) 量子回路・量子計算実験

上の効率的な初期化アルゴリズムの一つの中心部分である量子フーリエ変換を用いた桁上げbit不要の加算回路を3-qubitの分子で実現し、様々な入力や条件について実験を行い、初めてその動作を実証した。

c) 核スピン偏極と量子計算の融合

核スピン偏極は固体でしか実現しておらず、核スピンによる量子計算は溶液でしか実現していないため、これらを融合するには、両方とも固体で行うか、あるいは、両方とも液体で行うかのいずれかが必要である。そこで、固体での量子ゲート実現法を考案した。

d) 多qubit量子回路構成法

(ABC) n 型の1次元高分子で量子回路を組む方法を研究し、従来の提案(Lloyd 93)の半分の手間で済む方法を考案した。(NTTコミュニケーション科学基礎研究所との共同研究)
核スピン偏極基礎研究グループ

a) 低磁場で偏極した核スピンのNMRの高磁場観測

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感度および分解能が高い。そこで、試料のシャトルシステムを作成し、低磁場で核偏極させた試料を高磁場中に移動してNMR信号を観測する試みを行った。まず低磁場でプロトンスピンを偏極し、高磁場中に試料を移動させてクロスポーラリゼーションによりC-13スピんに偏極を移し、ナフタレン単結晶のC-13スペクトルを高感度高分解能で観測することに成功した。

b) レーザー光透過の研究

三重項状態に光励起可能な分子をドープした系における光透過に関する理論は現存しない。この理論を構築し、与えられた試料に対して、光マイクロ波誘導核偏極に最適のレーザーパルス幅、レーザー光強度、試料の厚さなどを求めることを可能にした。さらに、さまざまな厚さを持った試料を用いて0磁場ESRの振幅を測定し、光の透過度を求めて理

論が正しいことを検証した。

c) 偏極機構の解明

integrated cross polarizationを行うと、まず光励起三重項電子スピンからペンタセン内のプロトンに分極が移動し、それがスピン拡散により宿主分子全体に拡がることを明らかにした。また、シミュレーションにより実験で得られた分極のbuildup曲線を再現する試みを行った。

d) ペンタセンをドーブしたp-テルフェニルにおける核偏極

p-テルフェニルはこれまで宿主分子に用いてきたナフタレンよりも一桁多くのペンタセンを含有することが出来る。このため、ナフタレンに比べて分極が素早くbuildupし得るという利点がある。しかし、p-テルフェニルの中央のフェニル基がフリップ運動を行っているため、T1が短く、大きな分極が得られないという欠点がある。そこで、中央のフェニルプロトンを重水素化することにより、T1を長くした試料でも実験を行った。また、すべてのプロトンを重水素化したp-テルフェニルにおいても実験を行った。すべての試料で、ペンタセン・ナフタレンの系よりも短時間で熱平衡磁化よりも数万倍大きな磁化が得られた。

結晶量子コンピュータ研究グループ

a) 初期化原理探索

実用的な固体NMR量子計算機の実現のためには、「初期化」法の確立と制御性の良い「量子相関」状態の実現が不可欠である。当班ではこれを解決する基盤的要素技術として半導体中の核スピンの超偏極を可能にする「光ポンピング法」に着目し、シミュレーションと基本設計を行った。

b) 初期化装置の開発と応用

NMRに必要な低温・強磁場という実験条件と両立可能な光ポンピング法の開発に成功した。本システムを用いて、量子計算機素子の有力候補であるInPの偏極実験を行い、隣核の偏極度を35%まで増強することに成功した。これにより「初期化」問題の克服に目処が立った。

c) NMR量子計算機の新タイプ提案

原理的に全く新しい量子計算機を考案した。量子相関と初期化の問題を解決する具体的な技術が導入されている。量子多体効果を利用して次元反強磁性マグノンを経典とする核スピン間結合を用いる方法で、マグノンの生成・消滅をマイクロ波で制御することにより制御ノットゲートのオンオフ切り替えが可能である。

光量子コンピュータ研究グループ

a) 多光子間もつれ合いを実験的に検証

光子数が2の状態（2光子状態）は、スピン1と同等の自由度をもち、量子ビット（qubit）を3状態に拡張した量子トリット(qutrit)として使用できる可能性がある。量子トリットの量子ビットに比した利点や、新たな応用可能性も指摘されている。今回我々は、光子数が2の状態間のもつれ合い（4光子もつれ合い）について、単に2つのもつれ

合った光子からは得られない結果を初めて得ることに成功した。(現在論文準備中)

b) 線形光学素子のみを用いた量子位相ゲート検証実験の設計

昨年度に考案した線形光学素子量子位相ゲートは、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。この検証実験を行うための光学系について検討、設計を行った。

量子コンピュータ理論研究グループ

a) 一般化測定と量子計算素子の量子限界の理論的解析

量子コンピュータの実装実験を理論的に基礎づけるためには、量子計算素子の実現にどのような物理的困難があるのかを明らかにすることが重要な問題である。量子誤り訂正理論の近年の成果により、十分に高い精度の基本論理素子が実現可能ならば、デコーヒーレンスによる困難が免れることが示されたが、基本論理素子の実現に関する一般論はまだ得られていない。本研究では、基本論理素子の実現に関する誤差解析を不確定性原理や保存法則から一般的に導く新しい理論的方法を開発した。前年度の研究により、測定精度と擾乱に関する従来の不確定性原理が成り立たない一般化測定のモデルが得られたので、量子計算素子の誤差解析に不確定性原理を利用するためには、新しい関係式を開発する必要がある。そのために、従来の関係式を改良して、任意の一般化測定に対して成立する測定精度と擾乱に関する正しい式を明らかにした。この関係式により、擾乱のない測定に関しては、測定誤差と初期状態における標準偏差の積が当該物理量の交換子の平均値で定まる下限をもつことが示された。さらに、この関係式を保存量をもつ測定相互作用に適用することで、Wigner-Araki-Yanase の定理の定量化が得られ、保存量と計算基底が非可換な場合に、保存量をもつユニタリ作用素でCNOTゲートのような量子計算素子の実現に際して、保存則から導かれる不可避な誤差が存在することが導かれた。初期化と読みとりの容易さから、論理的1量子ビットを一つの物理的2準位系(スピン1/2系)で表現することが、現在の量子計算素子実現の標準的方法となっているが、このような計算基底のコーディングによると、量子計算素子実現には角運動量の保存法則に由来する不可避な誤差が存在することが導かれる。上述のWigner-Araki-Yanase の定理の定量化を利用して、CNOTゲート、Toffoliゲート、Fredkinゲートのそれぞれについて、スピン1/2計算基底における不可避な計算誤り確率の評価をおこなって、次の結果を得た。目的とされる論理的ユニタリ変換を起こさせるためのアンシラがn量子ビットの場合、CNOTゲート実現には $1/4(2+n)^2$ の不可避な誤り確率が存在し、Toffoliゲート及びFredkinゲートの実現には $1/4(3+n)^2$ の不可避な誤り確率が存在する。一方、アンシラが平均光子数Nの円偏光コーヒーレント光(制御光)とすると、それぞれのゲート実現には $1/(16N)$ の不可避な誤り確率が存在する。Enk-Kimble (2001)、Gea-Banacloche (2002)らは最近の論文で、特定の相互作用のモデルにもとづいて誤差確率が制御光の強度に反比例することを導いているが、本研究では同じ結論をモデルによらずに保存法則だけから極めて一般的に導いた。このような一般的な方法の利点は、特定のモデルで得られた知見を一気に任意のモデルに適

用可能にできることで、今後、核スピンネットワーク量子コンピュータ及び光量子コンピュータの実験グループとの統合的研究により、それらの実験を理論的に基礎づける評価理論に応用されることが期待できる。

b) 量子オラクル付き計算モデルの基本性質の解析

量子オラクル付き計算モデルの基本性質の解析に関する研究では、当研究グループと Imperial College の Vedral 教授のグループと共同研究を行い、量子一方向性順列の存在問題のある状態に関する折り返し変換の計算量的複雑さで特徴付けることを試みた。その結果、ある状態の集合に関する折り返し変換の列が効率的に実行可能であることと量子一方向性順列の非存在が同等であることを証明した。その一方でグローバーのアルゴリズムをもとに、ある状態の生成とその状態に関する折り返し変換が同等の計算量的複雑さをもつという仮定が量子一方向性順列の非存在を導くことを示した。

3. 研究実施体制

分子量子コンピュータ研究グループ

- ①研究分担グループ長：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：a) 核スピン量子コンピュータの効率的な初期化アルゴリズム
b) 量子回路・量子計算実験
c) 核スピン偏極と量子計算の融合
d) 多qubit量子回路構成法

核スピン偏極基礎研究グループ

- ①研究分担グループ長：寺尾 武彦（京都大学大学院理学研究科、教授）
- ②研究項目：a) 低磁場で偏極した核スピンのNMRの高磁場観測
b) レーザー光透過の研究
c) 偏極機構の解明
d) ペンタセンをドーピングしたp-テルフェニルにおける核偏極

結晶量子コンピュータ研究グループ

- ①研究分担グループ長：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：a) 初期化原理探索
b) 初期化装置の開発と応用
c) NMR量子計算機の新タイプの提案

光量子コンピュータ研究グループ

- ①研究分担グループ長：竹内 繁樹（北海道大学電子科学研究所、助教授）
- ②研究項目：a) 線形光学素子による量子位相ゲート、量子回路の研究
b) 量子計算への応用を目指した多光子間もつれ合いの生成と制御の研究

量子コンピュータ理論研究グループ

- ①研究分担グループ長：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 : a) 一般化測定と量子計算素子の量子限界の理論的解析
b) 量子オラクル付き計算モデルの基本性質の解析

4. 主な研究成果の発表 (論文発表および特許出願)

(1) 論文 (原著論文) 発表

- A. Goto, T. Shimizu, H. Kitazawa, G. Kido, K. Shimamura, T. Fukuda and K. Hashi, Investigation for nuclear spin couplings in the lithium fluorides as possible candidates for a crystal NMR quantum computing device, Applied Physics A, 74 (2002) 73-77.
- Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi, Quantum Filter for Nonlocal Polarization Properties of Photonic Qubits, Physical Review Letters 88, 147901 (2002)
- Toshiki Ide, Holger F. Hofmann, Akira Furusawa, Takayoshi Kobayashi, Gain tuning and fidelity in continuous-variable quantum teleportation, Phys. Rev. A 65, 062303 (2002)
- M. Ozawa, Position measuring interactions and the Heisenberg uncertainty principle, Phys. Lett. A 299, pp.1-7 (2002)
- Kenjiro Hashi¹, Tadashi Shimizu¹, Atsushi Gotō¹, Tsukasa Kiyoshi¹, Shinji Matsumoto¹, Hitoshi Wada¹, Teruaki Fujito², Ken-ichi Hasegawa², Masatoshi Yoshikawa³, Takashi Miki³, Satoshi Ito³, Mamoru Hamada³ and Seiji Hayashi³, ¹National Institute for Materials Science (NIMS), ²JEOL Ltd., ³Kobe Steel Ltd., Achievement of a 920-MHz High Resolution NMR, Journal of Magnetic Resonance, Volume 156, Issue 2, Pages 318-321 (2002)
- K. Takegoshi and T. Terao, ¹³C nuclear Overhauser polarization nuclear magnetic resonance in rotating solids: Replacement of cross polarization in uniformly ¹³C labeled molecules with methyl groups, Journal of Chemical Physics 117(4), pp.1700-1707 (2002)
- M. Ozawa, Conservative Quantum Computing, Phys. Rev. Lett. 89, 057902 (2002)
- Holger F. Hofmann and Shigeki Takeuchi, Quantum phase gate for photonic qubits using only beam splitters and postselection, Phys. Rev. A., Vol. 66 024308, (2002)
- A. Goto, T. Shimizu, K. Hashi, Magnon-mediated NMR quantum gates in a 1-D antiferromagnet, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 71, No. 9, (2002) 2125-2127
- K. Takeda, K. Takegoshi and T. Terao, Zero-field electron spin resonance and theoretical studies of light penetration into single crystal and polycrystalline material doped with molecules photoexcitable to the triplet

- state via intersystem crossing, *Journal of Chemical Physics* 117(10), pp.4940-4946 (2002)
- Holger F. Hofmann, Causality in quantum teleportation: Information extraction and noise effects in entanglement distribution, *Physical Review A* 66, 032317 (2002)
 - M. Ozawa, Halting of quantum Turing machine, in *Unconventional Models of Computation*, edited by C. S. Claude, M. J. Deneen, F. Pepper), 58-65 (Springer, Berlin, 2002)
 - Kenji Tsujino, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki, A detailed analysis of the delity of quantum teleportation using photons Considering real experimental parameters, *Phys. Rev. A.*, Vol66 No.4, 042314 (2002)
 - 竹内繁樹, 量子コンピューター研究の近況レポート, *応用物理* 第71巻, 第11号, pp.1367-1371
 - S. Takeuchi, Twin Photon Beams for Single Photon Generation, *Proceedings of the 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '01)*, Edited by Y. A. Ono and K. Fujikawa (World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey), pp.98-103 (2002)
 - Kenji Tsujino, Shigeki Takeuchi and Keiji Sasaki, A detailed analysis on the fidelity of quantum teleportation using photons, *Proceedings of the 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '01)*, Edited by Y. A. Ono and K. Fujikawa (World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey), pp.76-79 (2002)
 - D. Ulam-Orghik and M. Kitagawa, Entanglement of an assembly of N identical two level atoms, *Proceedings of the 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '01)*, Edited by Y. A. Ono and K. Fujikawa (World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey), pp.287-290 (2002)
 - A. Fujiwara, Statistical estimation of a quantum channel, *Proceedings of the 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo '01)*, Edited by Y. A. Ono and K. Fujikawa (World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey), pp.40-43 (2002)
 - Atsushi Goto, Tadashi Shimizu, Kenjiro Hashi, Hideaki Kitazawa, and Shinobu Ohki, Decoupling-free NMR quantum computer on a quantum spin chain, *Physical Review A* 67, 022312
 - M. Ozawa, Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement, *Phys. Rev. A* 67,

042105(1-6), (2003).

- E. Kashefi, H. Nishimura, and V. Vedral, A note on one-way quantum permutations, *Quant. Info. Process.* 2 379-398 (2002)

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数: 1 件 (研究期間累積件数 2 件)