

「量子と情報」研究領域 領域活動・評価報告書

—平成20年度終了研究課題—

研究総括 細谷 暁夫

1. 研究領域の概要

この研究領域は、量子力学的現象を利用した情報処理を実現するために、量子力学と情報処理の間に横たわる諸問題の解決に資する研究を対象とするものです。

具体的には、量子もつれ効果の強さと情報処理能力の関係についての理論的・実証的な研究、新しいアルゴリズムの創出、量子状態の評価技術、記憶方法、量子情報の高密度伝送方式、通信における符号化・誤り訂正・情報セキュリティ等、安全かつ高速の情報処理を実現するための基盤を拡充する抜本的、革新的な研究を対象とします。

2. 研究課題・研究者名

別紙一覧表参照

3. 選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

1) 選考は「量子と情報」領域に設けた選考委員 11 名と研究総括で行う。

2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。

3) 選考に当たっては、募集要項に示した選考基準を基本としたが、以下の点に特に留意した。

量子と情報の分野を広く捉えて、理論・実験とも何かをやってくれる人であることを面接選考で十分に見たつもりである。国立大学・私立大学および企業の研究者のバランス、ジェンダー・年齢など、3 年間を通してみると、結果的にバランスが取れたと考える。

4. 選考の経緯

一応募課題につき領域アドバイザー3 名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補者を選定した。

| 選 考 | 書類選考 | 面接選考 | 採用者 |
|------|------|------|-----|
| 対象者数 | 22 名 | 8 名 | 5 名 |

5. 研究実施期間

平成 17 年 10 月～平成 21 年 3 月

6. 領域の活動状況

領域会議:7 回

研究報告会:1 回

研究総括(または技術参事)の研究実施場所訪問:研究開始時に、研究総括と技術参事が研究者を訪問し、研究目標に対する意気込みを伺い、それに対して研究総括から激励及びコメントを行なった。同時に研究環境を把握して、上司に協力を要請した。その後、年 1 回(年度末)は、研究総括と技術参事が、研究進捗の把握と支援を目的に訪問した。また、研究実施場所の移動の際には、技術参事が適宜訪問した。

7. 評価の手続き

研究総括が研究者からの報告・自己評価を基に、必要に応じて領域アドバイザーの協力を得て行った。また、研究終了報告会の参加者の意見も参考に行った。

(評価の流れ)

平成 20 年 11 月

研究報告会開催

平成 21 年 1 月

研究報告書及び研究課題別評価書提出

平成 21 年 2 月

研究総括による評価

8. 評価項目

- (1) 研究開始時の研究構想を基準に研究の達成度
- (2) 外部発表(学術論文、口頭発表など)、特許など研究成果の発信状況
- (3) 学術賞、学会招待講演、新聞記事発表など外部からの評価状況
- (4) 得られた研究成果の科学技術への貢献

9. 研究結果

理論研究では、小川朋宏研究者は、作用素環論を基礎に、量子仮説検定、量子状態族の統計的同等性、量子誤り訂正条件などに、精密な理論的成果を得た。その中で古典情報理論における新しい証明の手法という重要な副産物もあった。

実験研究では、松下道雄研究者は、磁場中の単一核スピンの量子状態の観測を主たる目標としていたが、最大のハードルを越え、今後は、磁場の制御などの課題へと進む。その中で開発した低温の顕微分光用の対物レンズは世界唯一であり、量子と情報の分野を超えた広い応用がある。遊佐剛研究者は核スピンの縦磁化を検出し、ナノ領域の核スピンの量子状態を光学的に制御する技術の確立に向けて、橋頭堡を築いた。阿部真之研究者はピコメートルオーダーでの探針位置決め技術の開発の上に立ってシリコン表面上に置かれた原子を識別する手法の確立と P/Si (100) 表面における FM-AFM 高分解能測定で世界を驚かせた。宇佐見康二研究者はスピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存するトポロジカルな量子位相の観測に成功した。

いずれも、量子情報科学・技術そのものと言うよりは、その周辺の基礎科学あるいは要素技術であるが、何れも将来重要になると確信している。

10. 評価者

研究総括 細谷 暁夫 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授

領域アドバイザー氏名(五十音順)

- 今井 浩 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授
- 井元 信之* 大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
- 枝松 圭一 東北大学 電気通信研究所 教授
- 小澤 正直 名古屋大学 大学院情報科学研究科 教授
- 北川 勝浩 大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授
- 佐々木 雅英 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター グループリーダー
- 高木 伸 富士常葉大学 環境防災学部 教授
- 竹内 繁樹 北海道大学 電子科学研究所 教授
- 蔡 兆申 日本電気(株) 中央研究所 ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員
- 南 不二雄 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
- 山本 喜久 スタンフォード大学 応用物理・電気工学科 教授

*平成 17 年 4 月から参画

(参考)

(1) 外部発表件数

| | 国内 | 国際 | 計 |
|-----|----|----|-----|
| 論文 | 3 | 31 | 34 |
| 口頭 | 41 | 57 | 98 |
| その他 | 6 | 1 | 7 |
| 合計 | 50 | 89 | 139 |

※平成 21 年 2 月現在

(2) 特許出願件数

| 国内 | 国際 | 計 |
|----|----|---|
| 2 | 1 | 3 |

(3)受賞等

・阿部 真之

1. 計測自動制御学会 計測自動制御学会賞(技術賞)(H20.8)
2. 日本学術振興会第167ナノプローブ委員会 ナノプローブ賞(H20.4)

(4)招待講演

国際 8 件

国内 3 件

「量子と情報」領域 研究課題名および研究者氏名

| 研究者氏名 (参加形態) | 研究課題名 (研究実施場所) | 現職 (応募時所属) | 研究費 (百万円) |
|-----------------|--|---|--------------|
| 阿部 真之 (兼任) | 異種原子組み替えによる 固体表面量子ビットの実現 (大阪大学大学院 工学研究科) | 大阪大学大学院 工学研究科 准教授 (同上 助教授) | 64 |
| 宇佐見 康二 (専任) | 測定過程を使った非古典的な 原子集団スピン励起の生成と制御 (Niels Bohr 研究所) | 科学技術振興機構 さきがけ 研究者 (同上 さきがけ「光と制御」領域 博士研究員) | 41 |
| 小川 朋宏 (兼任) | 量子通信路の可逆性と 情報理論的・幾何学的保存量の評価 (電気通信大学大学院 情報システム 学研究科) | 電気通信大学大学院 情報システム学研究科 准教授 (東京大学大学院 情報理工学系研 究科 助手) | 12 |
| 松下 道雄 (兼任) | 単一分子分光による 固体中の単一スピンの観測 (東京工業大学大学院 理工学研究科) | 東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授 (同上 助教授) | 55 |
| 遊佐 剛 (兼任) | 新しい核磁気共鳴を用いた 核スピンの量子状態制御 (東北大学大学院 理学研究科) | 東北大学大学院 理学研究科 准教授 (日本電信電話(株) NTT物性科学 基礎研究所 リサーチアソシエイト) | 64 |

研究課題別評価書

1. 研究課題名

異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現

2. 氏名

阿部 真之

3. 研究のねらい

(Scanning Tunneling Microscopy: STM)を用いた原子操作は、金属表面に希ガス元素や分子を吸着させて行われてきた。つまり、STMの探針で原子や分子を動かし易くするために、動かされる原子・分子と表面は、弱い吸着力で結びつく材料の組み合わせが必要であり、それが熱拡散しないように極低温環境下で行われてきた。このような原子操作実験の現状から、Kane型量子コンピュータで提案されているようなP/Si系での原子操作は原子同士が強い共有結合をするため、P原子を動かすことは非常に困難である(B. E. Kane, Nature (London) 393, 133 (1998).)。したがって、Kane型の量子コンピュータの実現は困難であると考えられてきた。

我々のグループでは、試料表面に埋め込まれている原子を動かすための手法(原子組み替え、図1(a))を発見し、文字を書くことに成功していた(図1(b)、Nature Materials 4, 156 (2005).)。この方法は、周波数変調方式の原子間力顕微鏡(Frequency Modulation Atomic Force Microscopy: FM-AFM)を用いて、隣接する二つの原子位置を入れ替える。動かされる原子は埋め込まれているので、実験は室温でも可能であることがこの手法の利点である。一方、この手法で原子を並べるには、いくつかの条件を満たさなければ不可能であり、数多くのP原子をSi基板表面で緻密に配列するためには解決すべき課題があった。主な課題を以下に示す。

(課題1) 原子組み替えは熱エネルギー kT を利用しており、実験は室温環境下で行う必要がある。しかし、室温環境下では熱ドリフトによって探針-試料間の相対位置のずれが生じるため、熱ドリフトが小さい非常にまれな時にしか実験ができない。さらに、熱ドリフトが小さいとしても、それがなくなることはなく、原子組み替え実験の精度を向上させることができない。

(課題2) 配列させるP原子は、Si(100)面第一層目に存在することを想定しているが、Si(100)表面には様々な欠陥、吸着原子(主に水素と考えられる)が存在し、P原子とこれらの不純物を識別する必要がある。元素の識別の単純な方法は凹凸を比較することで行われているが、複数の原子・欠陥が存在する表面で、凹凸の違いによる比較は難しいと考えられる。したがって、試料の凹凸以外で原子種を識別する方法が必要となってくる。

(課題3) 表面科学の分野では、P/Si(100)に関する研究は、この表面を作成することが難しいため、これまであまり行われてこなかった。

以上をふまえて本研究では、探針-試料間の位置制御技術、表面原子識別技術、原子組み替えに必要な力の定量化や原子組み替え手法の検討、P/Si(100)表面における原子間力顕微鏡の観察条件、に関して主に研究を行ってきた。

4. 研究成果

【研究方法】 本研究では、上述したFM-AFMを用い、原子組み替えを行うための課題解決を行うことを目的としている。具体的には、FM-AFMで試料表面原子を観察し、原子種を識別し、原子の組み替えを行う。FM-AFMの動作原理を図2に示す。FM-AFMでは、カンチレバーのばね定数と

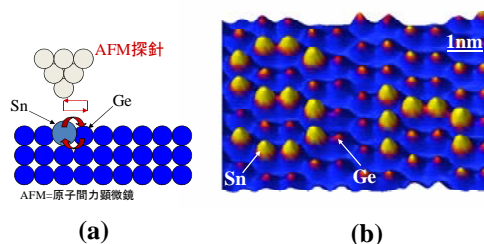


図1 (a) 原子組み替えの模式図と(b) 原子組み替えで作成した原子文字。

AFM探針の質量で決まる機械的共振周波数 f_r で一定の振幅で振動させる(図2(a))。AFM探針を試料表面に近づけると、試料表面との相互作用力によって、共振周波数の変化(周波数シフト Δf)が生じる(図2(b))。FM-AFMでは Δf を測定し、試料表面の画像を得る。通常の測定は Δf が負となる領域(引力領域)で行う。凹凸画像を測定するためには、 Δf が一定になるように探針-試料間距離のフィードバック制御を行う。STMと異なる点は、STMがトンネル電流を測定するため導電性試料でしか測定できないが、FM-AFMは探針先端の原子と試料表面原子の相互作用力を検出するため、原理的にはどのような試料も測定が可能となるところにある。

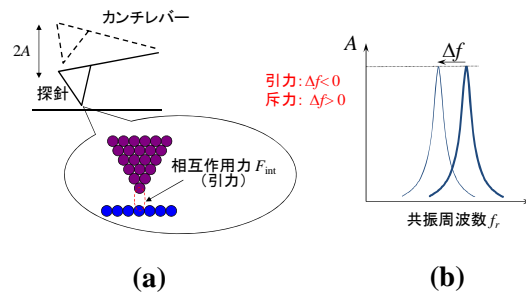


図2 FM-AFMの動作原理。相互作用力によって生じた、カンチレバーの共振周波数の変化(周波数シフト)をとらえる。

【研究成果】 プロジェクトの成果のいくつかを以下にあげる。

成果1: ピコメートルオーダーでの探針位置決め技術の開発

上述の(課題1)に示した熱ドリフトの影響を抑える技術の開発に成功した。具体的には、探針先端原子を試料表面の任意の原子位置に固定できるもので、熱ドリフトによる位置のずれを一種のフィードバックによって補正している(アトムトラッキング、Appl. Phys. Lett. **87**, 173503 (2005)、Nanotechnology **16**, 3029 (2005))。さらに、あらかじめ熱ドリフト挙動を予測し位置の補正を行う(フィードフォワード)(Appl. Phys. Lett. **90**, 203103 (2007))ことを可能にした。アトムトラッキングとフィードフォワード技術を、試料表面の測定に適用した。図3は Si(111)-(7x7)表面の FM-AFM 測定を室温環境下で行った結果である。図3(a)-(c)は熱ドリフト補正を行いながら連続して、画像測定を行った結果であり、図3(d)-(f)は補正を行っていない場合である。測定範囲を固定しているにもかかわらず、補正を行っていない場合((d)-(f))は画像化されている位置がずれていっているが(図中の星印参照)、補正を入れている場合((a)-(c))は原子位置が同じであることがわかる。このようにアトムトラッキングとフィードフォワードを組み込むことで室温環境下でも、擬似的に極低温環境を作り出すことを可能にした。この結果、室温環境下であっても、探針の動きを精度良く制御できることが可能となり、FM-AFM を用いた原子識別や原子操作の実験のレベルや再現性が飛躍的に向上した。

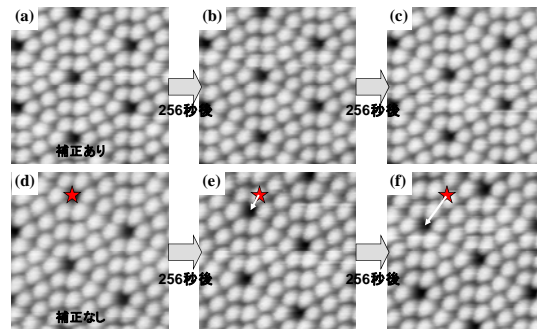


図3 Si(111)-(7x7)表面におけるFM-AFMの連続測定の画像。測定は室温で行った。(a)-(c)熱ドリフト補正を入れた場合の画像、(d)-(f)熱ドリフト補正なしの場合の画像。

成果2: 原子識別手法の確立

(課題2)に対する試料表面原子種を識別するための手法として、フォーススペクトロスコピーを利用することを考案した。フォーススペクトロスコピーは、探針原子と試料原子の間に働く力の距離依存性を求める方法である(図4)。フォーススペクトロスコピーを高精度に行うことで、原子種の識別だけでなく、表面活性度、結合半径、結合力、結合ポテンシャル、電荷移動、原子間の絶対距離といった、力学測定固有の局所的な情報を抽出することが可能になる。この測定手法は、

「原子レベル」という観点から走査型トンネル分光(STS) (R. J. Hamers, R. M. Tromp, and J. E. Demuth: Phys. Rev. Lett. **56**, 1972 (1986))や非弾性トンネル振動分光(IETS、例えば B. C. Stipe, M. A. Rezaei, and W. Ho, Science : **279**, 1907 (1998))に匹敵する価値があり、さらには絶縁体へも利用できることから、新しい物性計測手法として期待される。しかしながら、以下に示すような課題があり信頼性のある測定が困難であった。第一に、原子レベルの局所的フォーススペクトル測定を行うには、探針をねらった原子の真上に固定する高精度の位置決めが必要である。特に、室温や液中ではいわゆる「熱ドリフト」のため探針と試料の相対位置が3次元的に変化し、高精度な測定は困難であった。第二に、FM-AFM の測定量はカンチレバーの共振周波数変化(周波数シフト)であり、力やポテンシャルを求めするには数値変換を行う必要がある。変換アルゴリズムはノイズに敏感であるため、測定量である周波数シフトのノイズを極力下げる必要があるが、カンチレバーの熱ゆらぎや回路帯域によって、力へ変換できるくらいにノイズを下げることは困難であった。また、一般的なローパスフィルタや移動平均でフィルタ処理をした場合、その影響が F - Z 曲線や U - Z 曲線の形状に現れてしまうため

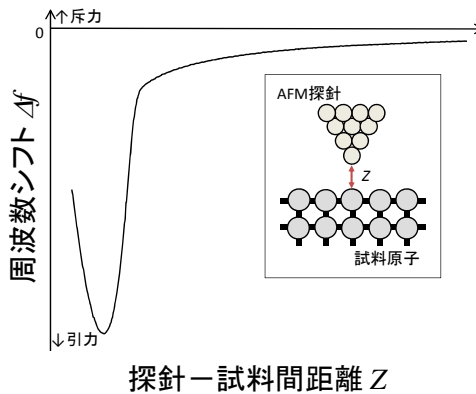


図4 探針-試料間距離 Z を変えたときの周波数シフト Δf の変化 (Δf - Z 曲線)。フォーススペクトロスコピーはこの Δf - Z 曲線を測定する手法である。

には数値変換を行う必要がある。変換アルゴリズムはノイズに敏感であるため、測定量である周波数シフトのノイズを極力下げる必要があるが、カンチレバーの熱ゆらぎや回路帯域によって、力へ変換できるくらいにノイズを下げることは困難であった。また、一般的なローパスフィルタや移動平均でフィルタ処理をした場合、その影響が F - Z 曲線や U - Z 曲線の形状に現れてしまうため

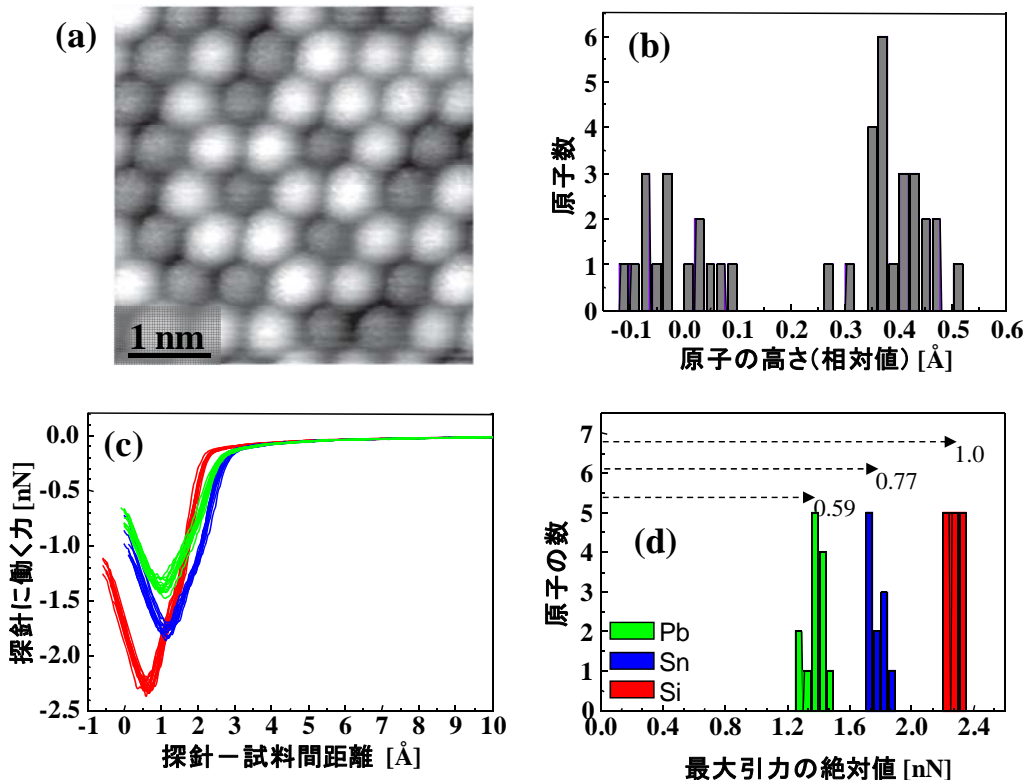


図5 (a) Si および Pb、Sn が混在する表面の FM-AFM 凹凸像。(b)図(a)のそれぞれの原子の高さのヒストグラム。(c)図(a)のそれぞれの原子におけるカー距離曲線測定の結果。(d) カー距離曲線測定の結果から得られた最大引力値のヒストグラム。

フィルタの使用は注意して行わなければならない。実際、フォーススペクトロスコピーの測定は、熱ドリフトが無視できる低温環境下のみでしか行われていなかった。しかも、極低温環境下であっても得られた力と距離の曲線の形状も物理や化学の教科書で示されているような理論計算による結果とは少し異なるものが得られていた。

そこで、成果1の技術を利用して熱ドリフトの影響を排除し、探針と試料原子の位置をピコメートルオーダーで制御できる手法を考案した。室温環境においてもフォーススペクトロスコピーを行うことが可能となり、測定データの再現性も大幅に改善された。その結果、フォーススペクトロスコピーのノイズレベルを5~10倍向上することが可能になり、原子識別への利用が可能となった。

フォーススペクトロスコピーによる原子種識別の例を行った結果を図5に示す(Nature 446, 64 (2007))。Si(111)-(7x7)清浄表面上に、SnとPb原子を蒸着しアニールすることで、SiおよびSn、Pbの3つのアドアトムが表面に混在する表面を作成し、FM-AFM測定を行うと、図5(a)のような画像が得られた。明るい(原子位置が高い)原子と暗い(原子位置が低い)原子の2種類があるように見える。そこで、図5(a)中にあるそれぞれの原子の位置(相対的な高さ)のヒストグラムを作成し、3原子種の高さの違いが得られるかどうかを確認したが、図5(b)に示すように、高さの分布から3種類の原子の種類を識別することはできなかった。そこで、図(a)中の39個の原子上でフォーススペクトロスコピーを行い、測定量である Δf -Z曲線からF-Z曲線を求めた(図5(c))。F-Z曲線は3つのパターンがあることがわかり、それぞれの曲線の最大引力のヒストグラムを求めた(図5(d))。その結果、ヒストグラムの分布が三つに分かれ、最大引力の値が一番大きいグループの平均値を1.0とすると残り二つのグループの平均値はそれぞれ0.77および0.59であった。これは、Sn/Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)およびPb/Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)表面におけるSn/SiおよびPb/Siの最大引力値の比と同じであることから、それぞれがSnおよびPb原子であることがわかり、凹凸からは識別できなかった原子がフォーススペクトロスコピーで識別できることがわかった。

実験を進めて行くにつれて、フォーススペクトロスコピーだけで原子種の識別を行うには、原子組み替え実験の効率が悪くなると判断し、新しい原子識別方法を考案した。具体的には、フォーススペクトロスコピーの測定概念を拡張した、探針と試料の相互作用力場を2次元的に視覚化するフォースマッピングによる原子種の識別(図6、Appl. Phys. Lett. 94, 023108 (2009))や、画像として原子を識別する手法を開発した(図7、Appl. Phys. Lett. 94, 023108 (2009))。

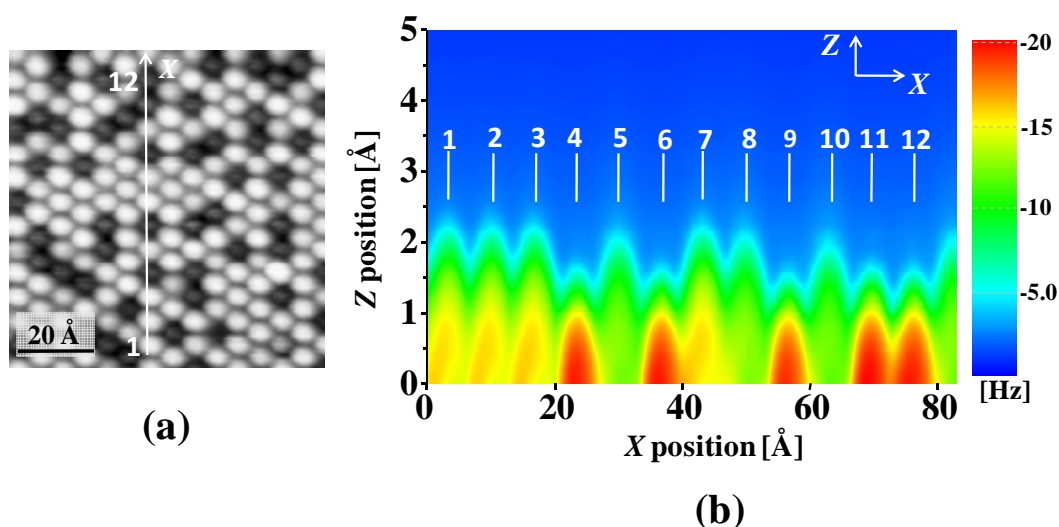


図6 (a)Si および Pb, Sn が混在する表面の FM-AFM 凹凸像。(b)図(a)上の矢印で行った二次元フォースマッピング。凹凸像では明暗2種類しか区別できないが、フォースマッピングでは、3つのパターンが認識できている。

成果3 : P/Si (100) 表面における FM-AFM 高分解能測定

半導体デバイスの研究において、Si原子中のP原子は、ドーパントとして重要な材料であるにもかかわらず、原子分解能で観察されることはあまりなかった。さらに、Si(100)表面におけるP原子の測定はほとんど行われてこなかった。これは、P原子を超高真空中で扱うことが困難であるからであると考えられる。通常は、 PH_3 を使用するのが一般的であるが、猛毒であるため、使用することができなかった。さらに、基板であるSi(100)表面は活性であるため、清浄表面を作成するのが難しいとされている。また、FM-AFMでのSi(100)表面の測定を安定に行った測定例がなかった。

清浄なSi(100)-(2x1)表面を実現するために、試料作成中の真空度や試料温度をモニターしながら試料を自動的に作成するシステムを構築し、さらにFM-AFMの観測条件を詳細に調べることで、安定にSi(100)-(2x1)表面を測定することが可能となった(図8(a), Jpn. J. Appl. Phys. 47, 6085 (2008))。さらに、超高真空中でP原子をSi(100)-(2x1)表面に吸着させるために、InP基板を用いて加熱し、In原子は基板正面のスクリーンに蒸着させ、真空中に P_2 分子を放出させることで、Si基板への吸着を行った。その結果、P原子を埋め込んだSi(100)面のFM-AFM測定を行うことが可能となった(図8(b))。

成果4 : 室温における原子操作に必要な力の定量測定

原子組み替えの特徴は、埋め込まれている原子を室温環境で動かすことができることにある。この場合、AFM 探針を用いて、試料の原子間の結合を切りながら原子を動かすことになる。再現性良く原子組み替えを行うためには、原子操作に必要な力を見積もりたいと考えている。図9は室温における原子操作実験の一例である。Si(111)-(7x7)表面において、空欠陥が存在するハーフユニットセルに着目し、空欠陥

に隣接する Si アドアトムを、空欠陥に移動する原子操作の実験を行った結果である(Phys. Rev. Lett. 98, 106104 (2007))。空欠陥に隣接する原子を移動するので、原子組み替えではないが、定量性を議論するためにこの表面で実験を行った。Si アドアトムの移動は、動かしたい Si アドアトムと空欠陥の方向に AFM 探針を走査するが、通常の画像測定よりも探針を試料に近づけ、通常の

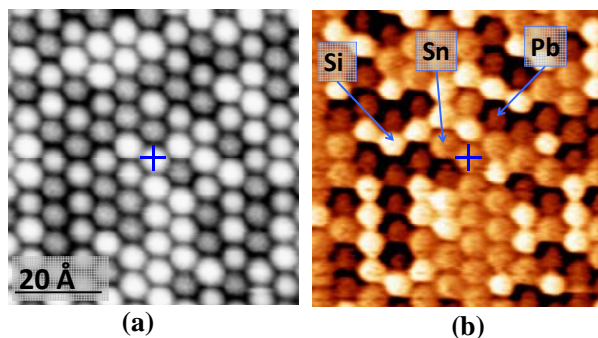


図7 (a)Si および Pb、Sn が混在する表面の FM-AFM 凹凸像。(b)同じ領域で同時測定した原子識別像。

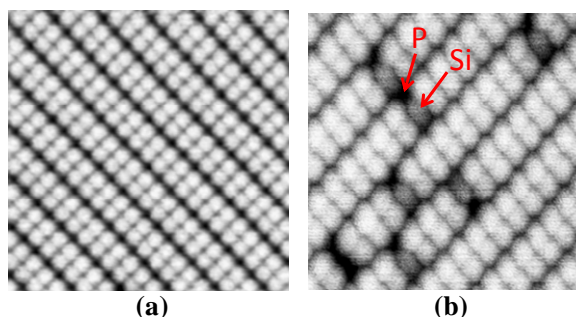


図8 (a)Si(100)-(2x1) 表面 と (b)P/Si(100)-(2x1)表面の FM-AFM 像。

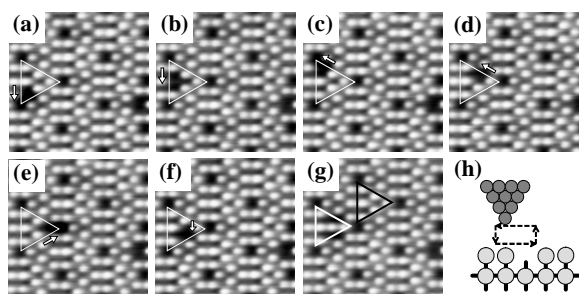


図9 Si (111)-(7x7) 表面における原子操作。空欠陥の存在するハーフユニットセル内で、空欠陥に隣接するアドアトムを空欠陥側に移動させ、その前後で FM-AFM 凹凸像を測定した。

画像測定とは異なる走査を行っている。具体的には、図9(h)に示すように、アドアトムを空欠陥へ動かす向きには AFM 探針を試料に近づけ走査し、いったん相互作用領域からはずれる場所まで探針を離してからはじめの場所に探針を戻す。これを数回繰り返していくとアドアトムは空欠陥へ移動する。図9(a)から(g)は連続的に原子操作を行った結果である。画像と測定する場合と原子を動かす場合に必要な周波数シフト Δf から力とポテンシャルを計算したのが、表1である。シミュレーションの結果から Si 原子と隣接する欠陥とのバリアハイトが約 1.2 eV であることから、非常に小さいポテンシャルエネルギーで原子が動いていることがわかった。この結果は、原子の移動(組み替え)には熱的エネルギーの効果や探針に働く横方向の力の寄与が大きいことを示している。横方向の力の寄与を求めるために、フォースマッピングから横方向の力を求めるための方法を考案しており(Phys. Rev. B 77, 195424 (2008))、今後、原子組み替えの定量実験に使いたいと考えている。

表 1 図 9 の実験における探針に働く力とポテンシャル

| 実験 | 探針にかかる力 | ポテンシャル |
|------|----------|-----------|
| 画像化 | -0.16 nN | -0.065 eV |
| 原子操作 | -0.47 nN | -0.127 eV |

成果 5 : 新しい原子操作モードの発見

原子組み替えでは、隣接する原子を AFM 探針で入れ替えるが、この手法で実際にキュービットとなる P 原子を並び替えるには非常に時間がかかる。この課題を解決できるかもしれない原子操作の新しいモードを発見した (Science 322, 413 (2008))。この方法では、探針先端にある原子をペン先のインクのように試料表面に落とすようにいき、埋め込んでいく(原子ペン)。この方法では、一つの原子を並べるのに一回の原子操作で完了するので非常に効率がよい。この方法で文字を書いた結果を図10に示す。画像測定時間も含めて1時間半程度で作成することができた(図1(b)は9時間必要であった)。

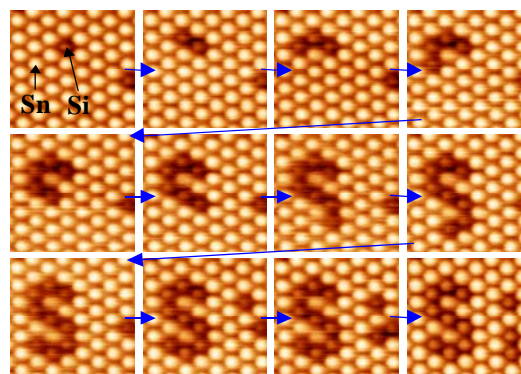


図 10 “原子ペン”による原子文字。

5. 自己評価

上述した「成果1」が本研究課題のすべてであったと考えている。「成果2」と「成果3」はそれぞれ、海外の理論グループとの連携もありNature誌とScience誌に採択されたが、「成果1」の結果がなくてはこれらの結果を得ることができなかった。原子組み替えを100%の確率で行うためには、原子種の識別や原子組み替え実験の定量化は必須であり、これらの課題は達成できたと考えている。一方、P/Si(100)清浄表面の作成条件とAFMの測定条件の解明に関しては、予想していた以上に困難であった。Si(100)表面が非常に良い真空度が必要(1×10^{-8} Pa以下)である上、AFM測定は走査型トンネル顕微鏡 (STM) よりも探針-試料間距離が小さいため、測定時に試料表面を破壊してしまうことがわかった。さらに、P原子を真空装置に導入するには、猛毒の PH_3 からPを分離する必要があり、大学での取り扱いが困難であった(結果的には別の方法を確立したが)。この結果、当初の予定であったP/Si(100)清浄表面での実験を進めることができなかった。

6. 研究総括の見解

極めて多くの重要な成果を上げられているので、とても詳述できませんが、基本的にはピコメートルオーダーでの探針位置決め技術の開発がキーになっています。その上立ってシリコン表面上に置かれた原子を識別する手法の確立とP/Si(100)表面におけるFM-AFM高分解能測定で

世界をうならせたと思います。両方とも、いずれ量子計算機の固体素子を作る上で重要な要素技術になると思います。一方、それ自体も興味深く、多くの人が使えるようにして下さる研究もされたので、今後は標準的になるのでは、と期待しています。また、予想外の展開として阿部さんの武器であるカンチレバーが量子制御の発展と繋がっていく可能性も最近出てきて、さきがけ領域会議では大いに盛り上がりました。将来有望な研究です。

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. Y. Sugimoto, T. Namikawa, M. Abe, and S. Morita: “Mapping and imaging for rapid atom discrimination: A study of frequency modulation atomic force microscopy”, *Applied Physics Letters* **94**, 023108 (2009).
2. Y. Sugimoto, P. Pou, Ó. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Pérez, and S. Morita, “Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy”, *Science* vol.322, 413 (2008).
3. Y. Sugimoto, K. Miki, M. Abe, and S. Morita, “Statistics of lateral atom manipulation by atomic force microscopy at room temperature”, *Physical Review B* vol.78, 205305 (2008).
4. M. Abe, Y. Sugimoto, T. Namikawa, K. Morita, N. Oyabu, and S. Morita, “Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy”, *Applied Physics Letters* **90**, 203103 (2007).
5. Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Pérez, S. Morita & Ó. Custance, “Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy”, *Nature* **446**, 64–67 (2007).

②特許出願

なし

③受賞

1. 計測自動制御学会賞(技術賞) 計測自動制御学会、業績名:“ピコメートルオーダーでの高精度位置決め技術の開発と原子レベル物性計測への応用”、平成20年8月21日
2. ナノプローブ賞 日本学術振興会第167ナノプローブ委員会、業績名:“原子間力顕微鏡で原子識別や原子操作を行うための新技術”、平成20年4月24日

④著書

1. Masayuki Abe, “Precise Force Measurement” Chap. 2 in “Noncontact Atomic Force Microscopy vol.2”, 2009 年出版予定(Springer)

⑤学会発表

1. M. Abe, Y. Sugimoto, and S. Morita, “Atomic force techniques for nano-engineering”, 2008 International Symposium on Physics of Quantum Technology, TU-K9
2. Y. Sugimoto, T. Namikawa, K. Miki, M. Abe, and S. Morita, “Vertical and lateral force mapping on the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy”, The 11th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM) (2008).
3. M. Abe, Y. Sugimoto, K. Miki, T. Namikawa, and S. Morita, “Imaging and Mapping for discriminating atom species using Non-contact Atomic Force Microscopy”, The 11th International Conference on Non-contact Atomic Force Microscopy(NC-AFM) (2008).
4. M. Abe, Y. Sugimoto, O. Custance, and S. Morita: “Drift-compensated data acquisition performed at room temperature with frequency modulation atomic force microscopy”, 17th International Vacuum Conference, July 2–6 2007, Stockholm, Sweden (NSP1–76).

⑥招待講演

1. 阿部真之: “LabVIEW で原子を見て動かす”, LabVIEW Days 2007, 2007/11/22, ザ・プリン
スパークタワー東京.
2. M. Abe: “Interchange atom manipulation toward the fabrication of solid quantum devices”,
Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2006, Nov. 20-22,
Osaka University Nakanoshima Center, Japan (O-4-3).

【B その他の主な成果】

①論文

なし

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

なし

研究課題別評価書

1. 研究課題名

測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御

2. 氏名

宇佐見 康二

3. 研究のねらい

Robert H. Dicke は、ミクロの物理からマクロの物理まで、また、理論と実験の双方で、‘全能の神 (Almighty God)’ と呼ばれるにふさわしい莫大な寄与をした希代の天才物理学者である。現代物理のかなりの分野 (原子時計、イオントラップ、宇宙定数問題、マイクロ波天文学、重力波検出等) が、Dicke の影響下で発展しているといっても過言ではない。これは、超専門化している現代物理学にとって、特筆すべき事実と言える。

そんな彼の偉大な業績の一つに超放射の予言というものがある[1]。1954 年、彼は光と2準位原子集団との相互作用において個々の原子の区別がつかない時、巨視的な集団2準位原子 (集団原子スピン) が一つの量子系としてコヒーレントに振舞うことを示唆した。巨視的な光がコヒーレントに振舞うのがレーザーであるので、この Dicke の超放射のアイデアは、いわば、原子スピン版レーザーといえる。(重要なのは、Dicke の超放射は、原子の内部自由度 (スピン) に関するコヒーレンスについての現象であり、ボーズ原子が外部自由度 (運動量) に関してボーズ凝縮した原子レーザーとは質的に異なる現象である。)

量子光学という分野がレーザーの発明によって開花したという歴史を鑑みれば、巨視的な原子スピンがコヒーレントに振舞うというこの Dicke のアイデアを発展させることで、量子力学的な原子集団スピン状態の探索が可能になることが期待できる。このような量子力学的な原子集団スピン状態の生成、観測、制御が本研究のねらいである。

4. 研究成果

原子集団スピンを量子光学のフレームで考察するために、先ずその類似性の根幹を理解する必要がある。その理解のベースになるのは、前述の Dicke の論文[1]と1986年のB. Yurke, S. L. McCallとJ. R. Klauderの3者による論文である[2]。Yurkeらは、光干渉計を構成する2つのボゾンモードの空間時間発展がJordan – Schwinger表示を通じて角運動量演算子の回転として記述できるという事実に着目した。光干渉計を偏極された集団スピン系として扱うことで、干渉計の位相シフト検出精度を見通しよく理論的に考察することが可能となる。この逆を行けば、偏極集団スピンが2つのボゾンモード、つまり光干渉計として考察できることになる。これが、原子集団スピン系を量子光学のフレームで考えるときの基礎となる。

原子集団スピン系における2モードとは、上向きスピンモードと下向きスピンモードに相当する。個々の原子を考えるのを止め、上向きスピンモードに原子がいくつ、下向きスピンモードに原子がいくつというように考えるわけである。いわば、スピン自由度に関する第二量子化である。注意すべき点は、このスピンの第二量子化が適用できるのは、あくまで完全偏極されたスピン状態 (つまり、原子の入れ替えという操作に対して波動関数が変わらない完全対称空間にいるスピン状態=ボゾンの交換関係を満足する空間) から出発し、かつ、その後も完全対称空間の中にとどまり続けるような操作 (つまり、スピン系の全角運動量を保存する操作) のみが許された場合である。Dicke が考察したように、光と原子スピンとの相互作用において個々の原子の区別がつかない時には、スピン系の発展は集団変数だけ記述でき、スピン系の全角運動量は保存する。したがって、原子集団スピン系で量子光学的実験を実施する上でのキーとなるのは、完全偏極されたスピン状態を生成し、その全角運動量を保存しながら集団スピン系を操作することであるといえる。このために必要な実験条件は、

- 1) スピン偏極が効率良く達成できること
- 2) スピンのコヒーレンス時間が長いこと

3) スピンの操作や読み出しのための相互作用において個々の原子の区別がつかないことが要請される。これらの要請を満足できる系として、レーザー冷却と光ポンピングによって用意できる偏極された冷却アルカリ原子を選んだ。真空チャンバー内でレーザー冷却された原子を利用することにより原子間の衝突や原子と容器との衝突によるスピンのデコヒーレンスを大幅に回避でき、さらに原子スピンの偏極度も比較的小さいバイアス磁場をかけるだけで各段に向上させることができる。また、ドップラー冷却された原子は、磁気光学トラップで空間的に局在させることもできるため、スピンの操作や読み出しのための相互作用において比較的均一に実施することが可能となる。特に所属研究室であった東京工業大学上妻研究室での研究とのマッチングの良さからアルカリ原子の中でも⁸⁷Rbを対象に研究を推進した。(本領域の遊佐氏が実施している固体中の偏極集団核スピン系も、上記の必要な実験条件を満たす量子集団スピントロニクスを実現できる非常に魅力的な系といえる。)

本研究の主な成果としては、

- 1) 原子集団スピン系の量子状態トモグラフィーの提案と、
 - 2) スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測、の2点が挙げられる。
- これらを、順をおって説明する。

1) 原子集団スピン系の量子状態トモグラフィーの提案 [3]

量子光学において、単一光子やスクィーズド光といった非古典的な光を観測しその性質を調べるために用いられる非常に強力な手法として、光ホモダイン測定が挙げられる。この手法は、観測したい極微弱な量子光(光子数にして0から100程度)を比較的強度の大きい局所光(光子数にして 10^5 から 10^{10} 程度:ホモダイン回路系の電氣的ノイズより光のショットノイズが大きいといけないという制限から光子数の下限が、レーザー光の強度ノイズや光検出器が線形領域から逸脱しないという制限から光子数の上限がきまる)とビームスプリッターで混ぜ合わせ、その出力の2つのモードの光子数差を測定するものである。この手法では、極微弱な量子光は局所光とコヒーレントに混合されるため、極微弱な量子光の信号が、局所光光子数の2乗根倍だけ増強されることになる(10^8 個の局所光の場合、 10^4 倍)。この手法により、光の真空揺らぎが観測可能になったために、スクィージング光のような量子光の研究が本格化し、また、量子状態トモグラフィーという光の位相空間上の情報を完全に獲得しうる手法へと発展したといえる [4]。このホモダイン測定の威力を非常に強く印象づけた実験は、Lvovskyらの2001年の実験である[5]。彼らの実験は、単一光子の分解能をもたない光検出器で構成されているにも関わらず、ホモダイン測定が局所光による信号増強効果のためにたった1つの光子をも検出可能であることを実証した。

我々の成果の一つは、2つのボゾンモードでの原子集団スピン系の考察を進めていくと、上記のホモダイン測定や量子状態トモグラフィーといった量子光学の手法を原子集団スピン系においても適用できることを理論的に明らかにしたことである[3]。下向きスピンの偏極された原子集団スピン系を考えると、光のホモダイン測定における局所光の役割をするのは、スピン下向きモードにいる巨視的な数の原子である(典型的な実験では、 10^6 から 10^{11} 個程度)。上向きスピンモードに原子がない場合、完全にスピンが偏極された状態であり、コヒーレントスピン状態と呼ばれる。これは、原子集団スピン系における真空状態と言える。この下向きスピンの偏極された原子集団スピン系から出発して集団的に操作し単一の原子だけをスピン励起させたり(ディック状態 [1]/ W状態)、偏極方向と垂直な方向に広がるスピン揺らぎを測定過程や非線形過程によ

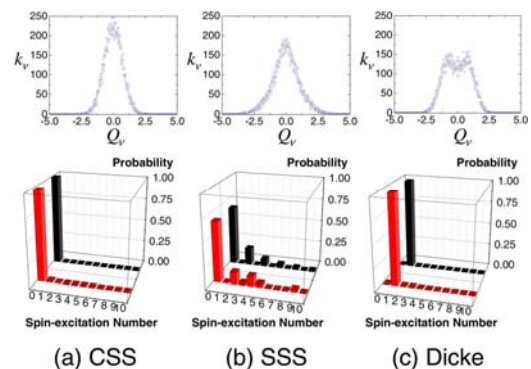


図1. 原子集団スピンの量子状態トモグラフィーのシミュレーション結果

リスクをさせたりする(スキューズドスピン状態[6])ことができれば我々のねらう量子的、非古典的な多体エンタングルメントをもつ原子集団スピン状態を実現できる。この場合には、上向きスピンモードにも原子が少数占有することになる。我々は、光のホモダイン測定と同様にして、この少数の上向きスピンモードにいる原子(0から100個程度)が上向きスピンモードにいる巨視的な原子(10^6 から 10^{11} 個程度)によって増強することで検出可能であることを示唆した。これはすなわち、ホモダイン測定と量子状態トモグラフィーを量子的な原子集団スピン状態に対して実施することが可能であること意味する。我々の論文[3]では、これらの量子集団スピントロニクス基礎となるであろう手法の具体的な実施方法を提供した。図1には、原子集団スピンに対するホモダイン測定と、その結果から上向きスピン原子数の分布を再構成した数値シミュレーション結果を示した[3]。図1(a),(b),(c)は、それぞれ、推定する原子集団スピンとしてコヒーレントスピン状態(CSS)、スピンスキューズド状態(SSS)、ディッケ状態(Dicke)を設定した場合の結果である。

2) スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測 [7]

非古典的な原子集団スピンの量子トモグラフィーの実証を目指し、レーザー冷却と光ポンピングによって用意した偏極された ^{87}Rb 原子を舞台に研究を進めた。本研究初期の段階で、非古典的な集団スピン状態を生成するための舞台としての $1/2$ -スピン系として、Zeeman副準位を使うか、超微細構造準位の2つの $m=0$ 副準位(いわゆる時計遷移)を使うかを検討した。その結果、スピニコヒーレンス時間が非常に長く(超微細構造時計遷移 $F=1, m=0 \rightarrow$

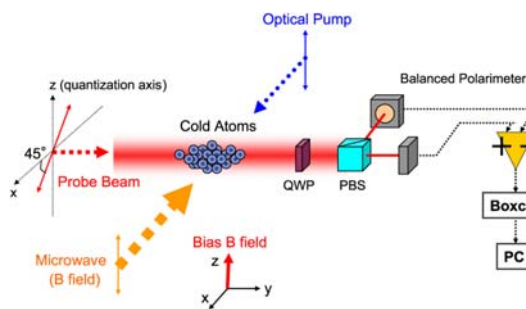


図2. 実験装置の概略

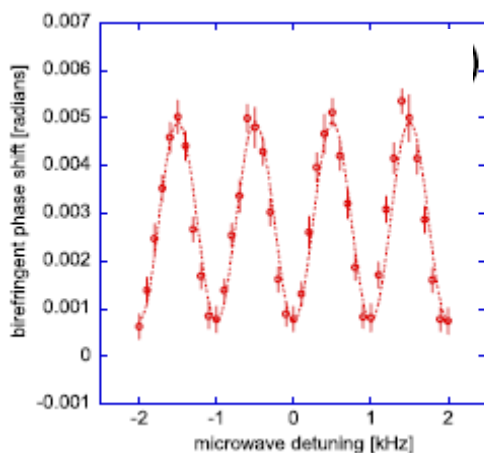


図3. 通常のラムゼイフリンジ

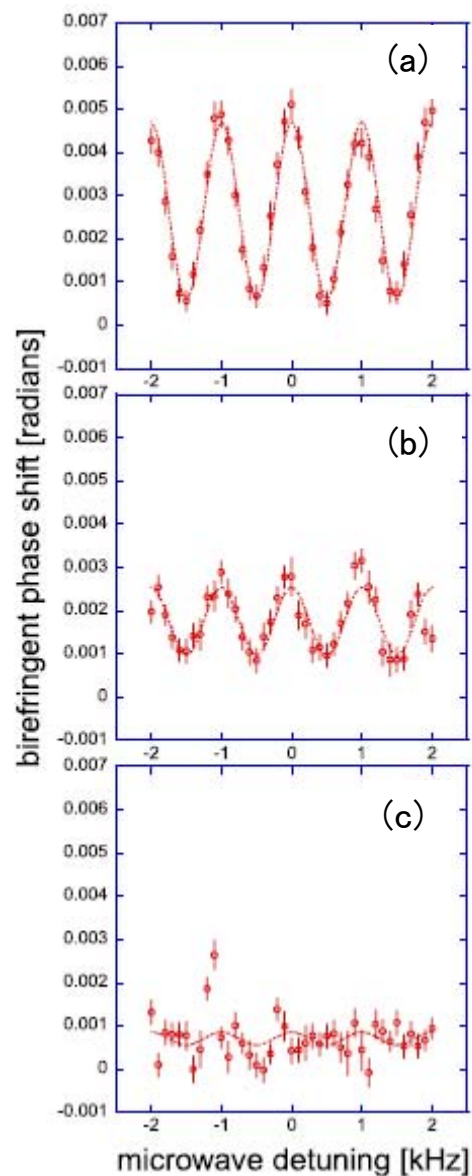


図4. バイアス磁場を反転した時のラムゼイフリンジ

$F=2, m=0$ は、一次のZeemanシフトがない。そのため磁場雑音に関する耐性がある)、他の研究領域への拡張性(原子時計等)のある点を見込み、時計遷移を $1/2$ -スピン系として使うという決定を下した。

そんな中、この時計遷移擬スピン系を使うと、非常に興味深い量子位相[8]の実験検証が可能であることに気づいた。フェルミ粒子は、 2π 回転で元に戻らず波動関数の符号が反転する。このよく知られた量子位相は、スピノール波動関数の3次元回転に関する2価性に起因する。ボーズ粒子は 2π 回転で元に戻るため、回転に伴う位相に関しては量子的な異常な振る舞いをしない自明なものと認識されてきた。ところが、1994年、イギリス・ブリストル大学の J. M. Robbins と M. V. Berry は、整数スピンでも自明でない振る舞いをすることがあるということを指摘した[8]。ボーズ粒子でも、スピン磁気量子数 $m=0$ の‘スピンの向き’に関しては 2π ではなく π 回転で元に戻るという奇妙な性質がある。彼らは、この π 回転に伴い、ボーズ粒子である $m=0$ スピンも非自明な量子位相を獲得することを示唆したのである。我々は、この非自明な量子位相の観測に向けて時計遷移擬スピン系の実験を開始し、2007年の春にこの位相の観測に成功した[7]。

図2に実験装置の概略を示した。Robins-Berry位相観測のため、我々はスピンのコヒーレンスを測定する非常に有用な手段であるラムゼイ干渉法を利用した。ラムゼイ干渉法による量子位相の観測実験は次のよう実施した。最初、磁気光学トラップで冷却原子集団を用意する。その後z方向のバイアス磁場のみ残して他の磁場を切った状況下で $|F=2, m=0\rangle$ という状態に光ポンプする。次に、時計遷移に共鳴するマイクロ波の $\pi/2$ パルスで $|F=2, m=0\rangle$ という超微細構造擬スピンを、 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という重ね合わせ状態にする。バイアス磁場をかけ続けることで、スピンの向きが変化しないようにすると、マイクロ波の周波数で回るフレーム上では、 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という重ね合わせ状態を維持することになる。2発目の $\pi/2$ パルスを当てると $F=1, m=0\rangle$ という状態になり、超微細構造擬スピンは完全に反転する。ところがマイクロ波パルスを超微細構造間隔と共鳴する周波数ではなく、離調をとったパルスで超微細構造擬スピンを操作する時には、1発目と2発目のマイクロ波パルス間に超微細構造擬スピンはマイクロ波の周波数で回るフレーム上を動くことになる。このため、2発目のマイクロ波パルスで超微細構造擬スピスが完全に反転しなくなることになる。離調を変えながら、2発目のマイクロ波パルスのあとの $|F=2, m=0\rangle$ 準位にいる原子の存在確率をプロットすると有名なラムゼイフリッジが得られた(図3を参照)。この実験は、超微細構造分裂のエネルギー差に起因する動力学的位相を観測したといえる。

図4に示したのは、1発目と2発目のマイクロ波パルス間にバイアス磁場を断熱的に反転した場合のラムゼイ干渉実験の結果である。Robins と Berry の議論によれば、この過程で、状態 $|F=2, m=0\rangle$ は1、 $|F=1, m=0\rangle$ は-1というそれぞれのパリティに依存して位相を獲得することになる。 $|F=2, m=0\rangle + |F=1, m=0\rangle$ という状態は、 $|F=2, m=0\rangle - |F=1, m=0\rangle$ という状態に変化することになる。状態 $|F=2, m=0\rangle$ には非自明な位相因子がつかないので、この状態を、 $|F=1, m=0\rangle$ の位相因子-1の観測のための参照として利用しようというわけである。その結果、離調が0であれば、2発目のマイクロ波パルス後の状態は、もはや $|F=1, m=0\rangle$ と反転せずもとの $|F=2, m=0\rangle$ に戻るようになる。離調を変えながら、 $|F=2, m=0\rangle$ 準位にいる原子の存在確率を測定することで、Robins と Berry の位相因子の効果で π だけ位相がずれたラムゼイフリッジを観測できたわけである。図4の(a)から(c)のフリッジビジビリティの差は、バイアス磁場の反転の仕方の差から生じている。(b)や(c)では、反転する際に磁場がゼロの付近を通過したため、外界の磁場ノイズの影響によりスピノコヒーレンスが減少したことが、フリッジビジビリティの減少を招いたと考えられる[7]。

5. 自己評価

当初の目的であった非古典原子集団スピンの量子トモグラフィーの実証に関しての現在までのところ、我々自身の成果としては、達成できていない。世界的には、コヒーレントスピン状態についてはニールス・ボーア研究所のグループ(現所属グループ)が光の量子メモリの文脈で、2004年の段階ですでに実証しているが[9]、現在のところ、私の知る限り、スピンスクイズド状態や、Dicke状態等の非古典的原子集団スピン状態の量子トモグラフィーは、まだ実現されていない。この実現へ向けて研究期間中に真摯に取り組む価値は大きかったといえる。この点に関

しては、私が当初の研究目的にしたがって研究を進めるというよりは、その時の自分の知的好奇心に正直に研究テーマをシフトしたことが原因である。その結果、当初の目標は達成できなかったが、逆に、未検証であったスピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測に成功した。研究計画に忠実に設定した目的に向けて研究を進めるか、知的好奇心を尊重するか
の判断は非常に難しいが、私自身は、明らかに後者に偏っていると思われる。重要で困難な問題にチャレンジしていくためには、前者の研究推進スタイルが必要不可欠であり、この点のバランス感覚を身につける必要があることを痛感している。

6. 研究総括の見解

実験研究の主な成果としては、当初の目標からはややずれて派生したもので、基礎科学として興味深い成果をあげました。それが、スピン量子数 $m=0$ 状態のパリティに依存する量子位相の観測です。これは、教科書的にきれいな実験で、トポロジカルな位相を見せています。この個性的な量子研究者は、理論にもめっぽう強く、海外に雄飛して将来大きな仕事をしてくれると確信しています。

参考文献

- [1] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99 (1954).
- [2] B. Yurke, S. L. McCall, and J. R. Klauder, Phys. Rev. A **33**, 4033 (1986).
- [3] K. Usami, J. Takahashi, M. Kozuma, Phys. Rev. A **74**, 043815 (2006).
- [4] U. Leonhardt, *Measuring the Quantum State of Light* (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1997).
- [5] A. I. Lvovsky, H. Hansen, T. Aichele, O. Benson, J. Mlynek, and S. Schiller, Phys. Rev. Lett. **87**, 050402 (2001).
- [6] M. Kitagawa and M. Ueda, Phys. Rev. A **47**, 5138 (1993).
- [7] K. Usami and M. Kozuma, Phys. Rev. Lett. **99**, 140404 (2007).
- [8] J. M. Robbins and M. V. Berry, J. Phys. A **27**, L435 (1994).
- [9] B. Julsgaard, J. Sherson, J. I. Cirac, J. Fiurasek, and E. S. Polzik, Nature (London) **432**, 482 (2004).
- [10] J. M. Geremia, J. K. Stockton, and H. Mabuchi, Science **304**, 270 (2004).

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. K. Usami, J. Takahashi, and M. Kozuma, “How to measure the quantum state of collective atomic spin excitation”, Physical Review A **74**, 043815 (2006).
2. Koji Usami and Mikio Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-dependent Phase of $m=0$ Spin States”, Phys. Rev. Lett. **99**, 140404 (2007).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書、出版物

1. 宇佐見康二, “ $m=0$ スピンもめぐる”, 日本物理学会誌 vol.63, No.12, pp.957-961 (2008).

⑤学会発表

1. 宇佐見康二、高橋純一、上妻幹男, “冷却原子の集団スピン状態の測定”, 日本物理学会

- 2006 年秋季大会, 24pWD-5.
2. K. Usami, J. Takahashi, and M. Kozuma, “Measuring the Quantum State of Collective Atomic Spin Excitation”, Vienna Symposium on the Foundations of Modern Physics (2007).
 3. Koji Usami and Mikio Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-dependent Phase of $m=0$ Spin States”, 第 17 回量子情報技術研究会 QIT2007-65 (2007).
 4. 笠原嘉晃、宇佐見康二、上妻幹男, “時計遷移疑スピンの量子ノイズ測定に向けた原子数揺らぎの抑制” 日本物理学会第 63 回年次大会, 26aQD-6 (2008).

⑥招待講演
なし

【B その他の主な成果】

①論文
なし

②特許出願
なし

③受賞
なし

④著書
なし

⑤学会発表
なし

⑥招待講演
なし

研究課題別評価書

1. 研究課題名

量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価

2. 氏名

小川 朋宏

3. 研究のねらい

古典的な確率分布族における十分統計量とは、確率分布族に対する知識についての損失がないデータ処理方法のことであり「データ処理の可逆性、情報量の不変性、確率分布族の分解定理」という三つの同等な特徴付けがあった。また古典的情報幾何は、十分統計量に関して不変な性質を反映した確率分布族の幾何構造として一意に特徴付けられていた。本研究では、これらの量子状態族における対応物は何か？という問題意識の元で、量子通信路(量子操作)の可逆性と情報量の不変性に関する研究を行った。

量子通信路は入力物理系のある量子状態族について、出力量子状態族から元の量子状態族を復元するような逆向きの量子通信路が存在するとき、可逆であるという(図1)。量子通信路の可逆性は、量子誤り訂正や量子秘密分散法といった量子状態を忠実に伝送するプロトコルにおいて、復号可能性条件を特徴付ける概念として重要である。一方、量子通信路は入力物理系のある量子状態族について、入力の変化によらず出力がただ一つの量子状態となると、消失的であるという。消失性は、入力の情報が出力で完全に失われていることを意味し、量子暗号や量子秘密分散法といったプロトコルにおいて、セキュリティ条件を特徴付ける概念として重要である。

これらと同時に、量子相互情報量や Holevo 相互情報量などの不変量を考えると、量子誤り訂正や量子暗号プロトコルの符号化効率評価、安全性評価に結び付く[1]。本研究では、量子通信路の可逆性、消失性に関する漸近理論を構築し、情報理論的保存量との関係を明らかにすることを目指した。

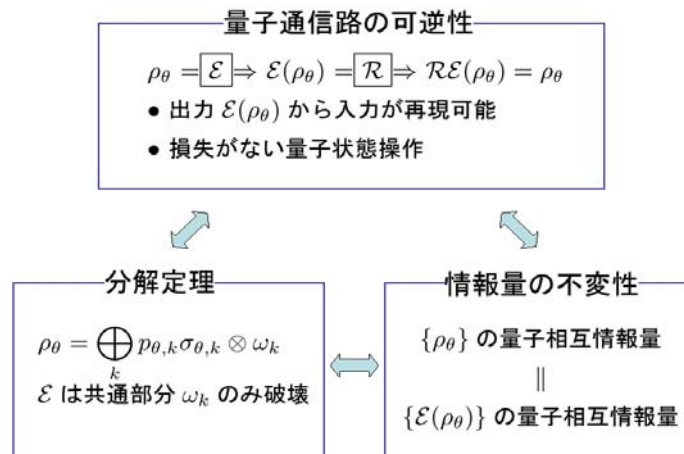


図 1: 量子通信路の可逆性

量子情報幾何は、量子状態族のつながり具合や近さを微分幾何学で表現することにより、量子推定理論における強力な道具と直感を提供する[2]。しかし、現状では推定や検定など問題によって様々な計量・接続が登場し、量子情報幾何は未完成的な状況にある。本研究では、量子状態族の遷移可能性についての研究を行うことにより、統計的・操作的に意味のある幾何学的不変量を

抽出し、量子情報幾何の構築に新しい手法を提供することを目指した。

4. 研究成果

4-1. 量子状態族の統計的同等性(相互遷移可能性)

量子通信路がある入力量子状態族について可逆なとき、入力量子状態族と出力量子状態族は統計的に同等であると言ってよい。なぜなら、一方の量子状態族についてのあらゆる実験結果は、もう一方の量子状態族についての実験結果から再現できるからである。またこのとき、不変量である相対エントロピーや Holevo 相互情報量は、二つの量子状態族で同じ値になる。

一方、任意に与えられた二つの量子状態族について、たとえ相対エントロピーや Holevo 相互情報量といった情報量が同じであったとしても、統計的に同等であるとは結論できない(実際に反例を得た)。それでは、量子状態族の統計的性質を決定付けるような完全不変量や情報量は存在するのであろうか？本研究では統計的同等性に関して以下の成果を得た。

(1) 量子 f -ダイバージェンスについての反例 [3,4]

古典的な情報理論において、Csiszar は f -ダイバージェンスと呼ばれる情報量のクラスを導入した。 f -ダイバージェンスは α -ダイバージェンスを含む情報量のクラスである。古典的な場合、二つの確率分布から成る確率分布族について、 α -ダイバージェンスは完全不変量であることが知られている。このことから f -ダイバージェンスが完全不変量であることが分かる。

一方、Petz は f -ダイバージェンスの量子対応物として、量子 f -ダイバージェンス(quasi-entropy)を導入した。量子 f -ダイバージェンスは量子情報理論の様々な問題において重要な役割を果たす。このことから、量子 f -ダイバージェンスが二つの量子状態から成る量子状態族についての完全不変量かも知れないと期待するのは自然である。しかし、本研究において反例を与え、量子 f -ダイバージェンスが完全不変量とはならないことを示した。

(2) 統計的同等性の必要十分条件 [3]

統計的同等性に関して、作用素環論を用いた考察を行い、与えられた量子状態族から作られる Connes コサイクルが生成する von Neumann 代数の同型性に帰着する必要十分条件を与えた。また、二つの量子状態からなる状態族について完全不変量を与えた。

(3) 古典的指数分布族の完全不変量 [3,5]

冒頭にも述べたように、古典的な情報幾何において Fisher 計量と α -接続は、十分統計量による不変性から定まる計量と接続という特別な意味を持っていた([2]を参照)。本研究では、古典的指数分布族において Fisher 計量と α -接続が完全不変量であることを示した。

4-2. 量子および古典通信路の漸近的可逆性 [6]

量子通信路の可逆性は、誤りゼロで量子状態を復元できるための条件であった。また、消失性は完全秘匿条件であった。現実的にも理論的にもこれらの条件はきつく、ごく小さな誤りを許したり、漸近的に誤りがゼロになることを要求すれば十分なことが多い。したがって「漸近的可逆性」「漸近的消失性」といった概念を構築し、量子相互情報量をはじめとする不変量との関係を研究する必要がある。

これらの概念は、近年めざましい発展を遂げた量子通信路に関する符号化定理と密接に結び付く。古典-量子通信路符号化定理は、量子通信路を多数回使用して古典的メッセージを漸近的に忠実に伝送する場合の符号化定理であり、通信速度の限界(通信路容量)が Holevo 相互情報量で与えられることを示す定理である。また、量子-量子通信路符号化定理は、量子通信路を多数回使用して量子状態そのものを漸近的に忠実に伝送する場合の符号化定理で、通信路容量が coherent information で表わされることを示す定理である。特に、量子-量子通信路符号化定理は、同一の量子通信路を多数回使用した定常無記憶量子通信路についての符号化定理であるが、相関を持った一般的な通信路に関しては未解決である。また、極限を用いて通信路容量が表わされているが、計算可能な簡明な式で表現できるかどうかは未解決である。本研究では漸近的可逆性について以下の成果を得た。

(1) 古典的通信路の漸近的可逆性に関する特徴付け

これまで古典的通信路においても、漸近的可逆性について、情報量の保存や分解定理と結び

つける研究はなされていない。そこで、最初に古典的通信路の漸近的可逆性について考察を行った。

漸近理論においては、入力確率分布族に事前分布を与えたとき、一般的に入力側の相互情報量と出力側の相互情報量がともに発散する。よって、これらの差に注目して、差がゼロに近づくことを相互情報量の漸近的不変性とした。漸近的に誤り(量子状態の距離や情報量の差)が指数的にゼロに近づくという条件のもとで「(a)相互情報量の漸近的不変性、(b)確率分布族の漸近的分解定理、(c)通信路の漸近的可逆性」が同等であることを証明した。また、漸近的に誤りが指数的にゼロに近づくという条件をはずすと、一般的に(a)⇒(b)⇒(c)が成り立つことを示した。

量子通信路の漸近的可逆性についても上記の同等性が成立すると予想されるが、現状では未解決である。

(2) 古典的相互情報量および Holevo 相互情報量の漸近的不変性

量子通信プロトコルの解析へ向けての応用例として、古典-量子通信路符号化定理を想定した解析を行った。古典-量子通信路符号化定理を本研究の文脈で述べると以下の通りである。任意に与えられた量子通信路の列に対して、通信路容量の指数的増大度の数の入力量子状態族をうまく選ぶことで、与えられた量子通信路の列が、この量子状態族について漸近的に可逆になる。

本研究ではランダムコーディングの手法を用いて、与えられた量子通信路の列に対して、通信路容量の指数的増大度の数の入力量子状態族が存在して、Holevo 相互情報量が漸近的に不変になることを証明した。

特別な場合として、古典的通信路と古典的相互情報量の漸近的不変性を含むため、古典的な場合の上記(a)を示したことになる。これは(1)より(c)と同等であったから、Shannon の通信路符号化定理の新しい証明方法を与えたことになる。また、(1)が量子通信路の場合に証明されれば、古典-量子通信路符号化定理の新しい証明方法になる。

4-3. 量子仮説検定と量子通信路符号化

量子仮説検定(単純量子仮説検定)は、二つの量子状態の候補から、測定によりどちらが真の状態であるかを統計的に識別する問題である。量子仮説検定は、単純な問題であるがゆえに、量子情報理論における非可換性による困難をシンプル形で浮き彫りにする。また、量子情報理論の多くの問題は、量子仮説検定における極限定理に帰着される。

量子仮説検定では、古典的な仮説検定と同様、第一種誤り確率と第二種誤り確率のトレードオフが論じられる。これらを同時に小さくすることはできないため、以下の問題設定がなされる。

(a) 第一種誤り確率を定数以下におさえたとき、第二種誤り確率の最適値が指数的に減少するときのスピード(指数)を求める問題(Stein 型)。

(b) 第一種誤り確率が指数的に減少するときのスピード(指数)を与えたときに、第二種誤り確率の最適値が指数的に減少するときのスピード(指数)を求める問題(Hoeffding 型)。

(c) 事前確率を与えたときに、平均誤り確率の最適値が指数的に減少するときのスピード(指数)を求める問題(Chernoff 型)。

量子仮説検定の最初の極限定理は、問題(a)の解答を与えた定理「量子 Stein の補題」[7,8]である。この定理は、第二種誤り確率の最適値が指数的に減少するときのスピードが量子相対エントロピーにちょうど等しいことを示し、量子情報理論において、古典論の「大数の法則」に代わる極限定理の役割を果たす。実際に本研究では以下を示した。

(1) 量子仮説検定と量子通信路符号化 [9]

古典-量子通信路符号化定理の証明において、受信量子状態からメッセージを識別するために、単純量子仮説検定を重ね合わせることで復号器を構成した。さらに「量子 Stein の補題」を大数の法則と同様に適用することで、復号器の誤り確率が漸近的にゼロになることを証明した。

一方、(b)は未解決問題[10]であったが、Chernoff 型の問題(c)への解答が[11,12]によってもたらされたことを契機に、このブレイクスルーに基づいて、Hoeffding 型の問題(b)もただちに解決され[13,14]「量子 Hoeffding の定理」が完成した。本研究では作用素環論を用いて研究を行い、以下の成果を得た。

(2) 相関を有する量子状態の識別 [15-17]

量子スピンチェーン上の相関を有する量子状態の仮説検定問題について, Chernoff 型[15]および Hoeffding 型[16]の問題に解答を与えた(図2). また, フェルミオン(CAR algebra)上の量子状態(quasi-free state)についても同様の結果を与えた[17].

(3) 量子スピンチェーン上の Gartner-Ellis 型大偏差原理 [15]

量子スピンチェーン上のオブザーバブルに対する Gartner-Ellis 型の大偏差原理について調べた. 大偏差原理を満たすために量子状態が満足すべき十分条件を与え, 状態が finitely correlated state または Gibbs state の場合に, この条件が満たされることを示した.

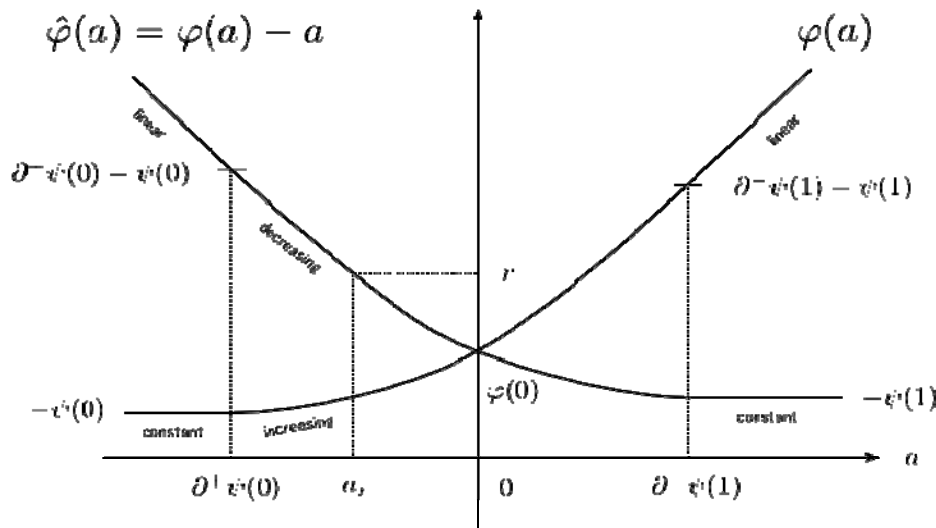


図2: 量子仮説検定における誤り確率のトレードオフ曲線

4-4. 量子誤り訂正条件と作用素環論 [18]

量子誤り訂正符号の非漸近的な場合の復号可能性条件について, 作用素環論の特徴付けを与えた. 作用素環論的に量子誤り訂正を眺めると, 受信者側のオブザーバブルが成す von Neumann 代数の部分代数で, 量子通信路によるデコヒーレンスの影響を本質的に受けない部分代数(multiplicative domain)が重要になることが分かった. 本研究では, multiplicative domain が量子通信路のシュレーディンガー描像を介して, 送信者側の符号部分空間 K 上の作用素代数 $L(K)$ と同型な場合, そしてその時のみ, 入力量子状態族は復号可能であることを証明した.

また, 環境系(または盗聴者)のオブザーバブル全体が成す代数が, 量子通信路のシュレーディンガー描像で, 送信側では自明な代数(単位元の定数倍)になることと, 上記の誤り訂正条件が同値であることを示した.

さらに可換子の議論を用いることで, 「量子誤り訂正可能なこと」と「盗聴者に何も情報を伝えないこと」が等価であることを作用素環論的に証明した. 作用素環論を用いるメリットは, 上記の事実がほぼ自明になることである.

参考文献

- [1] T. Ogawa et al., Physical Review A, 032318, 2005.
- [2] S. Amari, H. Nagaoka, Methods of Information Geometry, AMS & Oxford University Press, New York, 2000.
- [3] T. Ogawa and H. Nagaoka, Information and Communication, Budapest, Hungary, August, 2008.
- [4] T. Ogawa and H. Nagaoka, University of Electro-Communications, UEC-IS-2005-5, 2005.
- [5] H. Nagaoka and T. Ogawa, University of Electro-Communications, UEC-IS-2005-4, 2005.
- [6] 小川朋宏, 第 31 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2008), pp. 445-449, 2008.

- [7] F. Hiai and D. Petz, Commun. Math. Phys., vol. 143, pp. 99–114, 1991.
- [8] T. Ogawa and H. Nagaoka, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 46, pp. 2428–2433, 2000.
- [9] T. Ogawa and H. Nagaoka, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 53, pp. 2261–2266 2007.
- [10] T. Ogawa and M. Hayashi, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 50, pp. 1368–1372, 2004.
- [11] M. Nussbaum and A. Szkola, arXiv:quant-ph/0607216, 2006, to appear, Ann. Statist.
- [12] K. M. R. Audenaert et al., Phys. Rev. Lett., vol. 98, p. 160501, 2007.
- [13] M. Hayashi, Phys. Rev. A, vol. 76, p. 062301, 2007.
- [14] H. Nagaoka, arXiv:quant-ph/0611289, 2006.
- [15] F. Hiai, M. Mosonyi and T. Ogawa, J. Math. Phys., vol. 48, 123301, 2007.
- [16] F. Hiai, M. Mosonyi and T. Ogawa, J. Math. Phys., vol. 49, 032112, 2008.
- [17] M. Mosonyi, F. Hiai, T. Ogawa and M. Fannes, J. Math. Phys., vol. 49, 072104, 2008.
- [18] 小川朋宏, 数理解析研究所講究録 1534, pp. 108–118, 2007.

5. 自己評価

本研究では量子情報理論, 量子情報幾何をバックグラウンドとして, 作用素環論を導入することで, 量子通信路の漸近的可逆性や量子状態族の統計的同等性についての研究を行った. その際の研究指針は情報理論的・幾何学的不変量との関連であった.

量子仮説検定をはじめとして, 量子状態族の統計的同等性, 量子誤り訂正条件の作用素環論的特徴付けなど, これまでに述べた一定の成果を得ることができた. 通信路の漸近的可逆性に関しては, 相互情報量が漸的に保存されることを示すことで通信路符号化定理を証明するという, 古典情報理論においても新しい手法を導入することができた.

三年前に大きな野望を抱いて研究構想を描いたが, はるか手前で時間切れとなってしまったように思う. 特に, 本研究の応用として当初計画していた, 量子暗号の安全性証明や量子誤り訂正符号の具体的設計については未完成である. しかし, さきがけ研究で試行錯誤する中で, 当初の研究構想の多くが, それほど間違えてはいないとの手応えを得た. また, さきがけ研究の特徴を生かして, 作用素環論の知識を習得することができ, この分野の研究者とディスカッションができるようになった.

6. 研究総括の見解

作用素環論を基礎に, 量子仮説検定, 量子状態族の統計的同等性, 量子誤り訂正条件などに, 精密な理論的成果を得ています. その中で古典情報理論における新しい証明の手法を開発することができたという重要な副産物もありました. それは通信路の漸近的可逆性に関しては, 相互情報量が漸的に保存されることを示して, 通信路符号化定理を証明するというものです. 小川さんの理解の深さと説明の丁寧さは他の研究者にも大変良い影響を与えました. 若い世代の育成という面でも将来に期待できます. さきがけ研究が世に送り出した人材として誇ることができます.

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. Tomohiro Ogawa, and Hiroshi Nagaoka, Making Good Codes for Classical-Quantum Channel Coding via Quantum Hypothesis Testing, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 53, no. 6, pp. 2261–2266, 2007.
2. Fumio Hiai, Milan Mosonyi, and Tomohiro Ogawa, Large Deviations and Chernoff Bound for Certain Correlated States on the Spin Chain, J. Math. Phys., vol. 48, 123301, 2007.
3. Fumio Hiai, Milan Mosonyi, and Tomohiro Ogawa, Error Exponents in Hypothesis Testing for Correlated States on a Spin Chain, J. Math. Phys., vol. 49, 032112, 2008

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

1. 小川朋宏, 数理科学事典(第2版):VIII, 1.9. 量子情報理論, 2009年出版予定(丸善)

⑤学会発表

1. Tomohiro Ogawa, On Reversibility of Quantum Operations and Quantum Mutual Informations, 9th Workshop on Quantum Information Processing (QIP2006), Paris, France, January, 2006.
2. Tomohiro Ogawa, On Reversibility of Quantum Operations and Quantum Secret Sharing Schemes, 37th Symposium on Mathematical Physics "Quantum Entanglement & Geometry, Torun, Poland, June, 2006.
3. 小川朋宏, 量子通信路の漸近的可逆性, 数理解析研究所講究録 1534, pp. 108-118, 2007.
4. Tomohiro Ogawa and Hiroshi Nagaoka, On Statistical Equivalence for Sets of Quantum States, Information and Communication, Budapest, Hungary, August, 2008.
5. 小川朋宏, 通信路の漸近十分性と通信路符号化定理, 第31回情報理論とその応用シンポジウム (SITA2008), pp. 445-449, 2008.

⑥招待講演

1. 小川朋宏, 量子仮説検定と量子通信路の可逆性—量子相対エントロピーの役割—, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 明治大学, 2008.

【B その他の主な成果】

①論文

1. Milan Mosonyi, Fumio Hiai, Tomohiro Ogawa, and Mark Fannes, Asymptotic Distinguishability Measures for Shift-Invariant Quasifree States of Fermionic Lattice Systems, J. Math. Phys., vol. 49, 072104, 2008.

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

なし

研究課題別評価書

1. 研究課題名

単一分子分光による固体中の単一スピンの観測

2. 氏名

松下 道雄

3. 研究のねらい

核スピンは取り得る量子状態の数が限られているので、量子情報の格好の担い手になる。ところが、現在まで行われてきた室温の溶液の核磁気共鳴 Nuclear Magnetic Resonance (NMR)による量子論理演算は、多数のスピンが作り出す巨視的磁化の操作と観測から成り立っており、量子情報はアボガドロ数程度の膨大な数のスピンの集団が担っている。核スピンの利点を活かした本格的な量子論理演算を行うには、個々のスピンを操作し、その量子状態を観測する必要がある。これを実現する実験手法の一つとして、本研究は単一分子分光の技術を用いて低温固体中の一つの不純物イオンの発光を検出し、その核スピン状態を光遷移のゼーマン効果を利用して検出することを目標としている。

4. 研究成果

本研究は個々のスピンの量子状態を知ることを目指しており、低温固体中の一つの核スピンに対して、その量子状態が変わらないうちに光でその状態を同定しようとするものである。具体的には、 LaF_3 結晶中にLaの 1/10000 程度混入させた Pr^{3+} の波長 478 nmの光遷移($^3\text{H}_4$ から $^3\text{P}_0$)を用いる。この遷移は磁場を加えたときの遷移エネルギーの変化が核スピン状態ごとに異なる。従って、あらかじめ一つの Pr^{3+} の発光しか検出しないような状況を作っておいた上で、どの波長の光でイオンが励起されて発光するかを調べればそのイオンの核スピンの量子状態が分かる。核スピンの量子状態が熱揺らぎによって変化してしまえば情報の担い手にならないので、測定は液体ヘリウム中で行う。

液体ヘリウム温度でイオン一個からの発光を検出することを目指して低温の顕微分光を始めるに当たり、先ず直面したのが対物レンズの問題である。試料に対する対物レンズの位置をしっかりと固定して試料からの微弱な発光をできるだけ大きな立体角で逃さず捉えるには、対物レンズを試料の直近に配置して液体ヘリウム中で使うことになる。市販の組みレンズは、材料の熱収縮によってレンズの相対配置が崩れてしまうなどのため液体ヘリウム温度では使うことができない。このため、球面収差を補正した単レンズを用いてきたが、本研究で励起に用いる波長 478 nmと検出する発光の波長 600 nm ではガラスの屈折率分散に起因する色収差が大

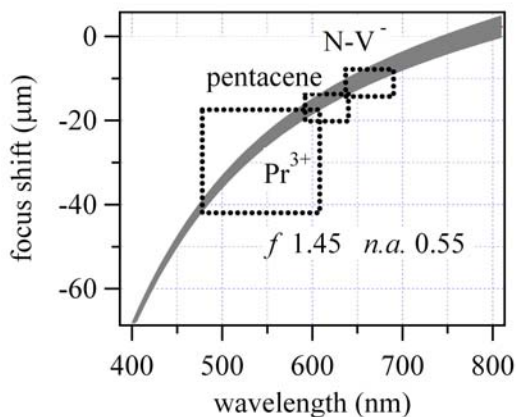


図1 単レンズ ($f = 1.45$ mm, $n.a. = 0.55$, 材質: CO550 glass)の焦点の色収差と被写界深度

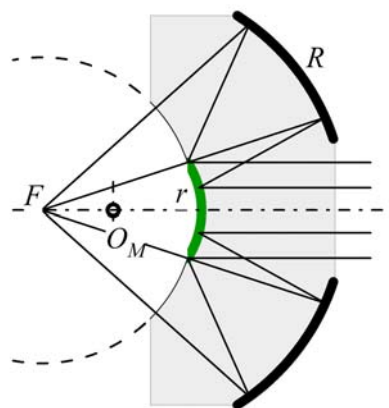


図2 一体成型反射対物レンズ

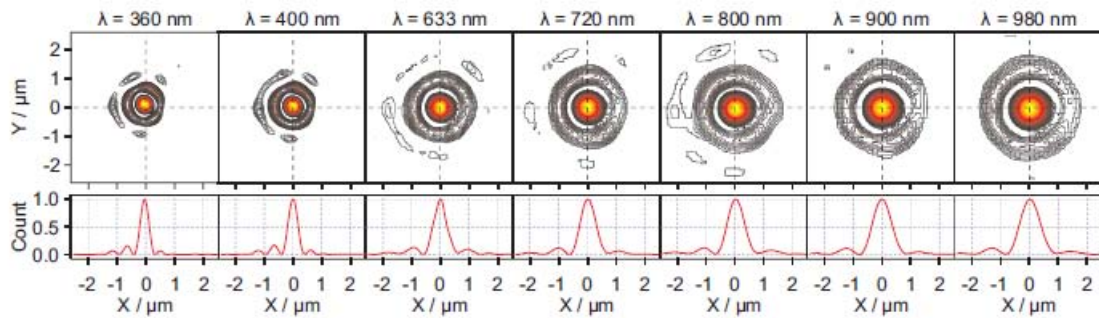


図3 $f = 2 \text{ mm}$ の一体成型反射対物レンズで撮った直径 100 nm のビーズの散乱像。レンズは液体ヘリウム中にあり、波長を変える間にレンズは全く動かしていない。

き過ぎて一枚のレンズでは両方を同時に扱うことができない。図1にこれまで対物レンズとして用いてきた非球面単レンズの焦点距離の波長依存性を示す。短波長になるほど波長依存性が強く、僅かな波長範囲でしか集光しない。図中の曲線の幅はそれぞれの波長における回折限界のスポットの奥行き、被写界深度をあらわす。回折スポットの中に入っていれば焦点を結ぶとみなせるが、スポットの大きさも波長に比例して短波長で小さくなる。改めて単一電子スピン遷移の観測が成功している二つの系を見てみると、励起波長が 590 nm 以上（橙から赤）と長波長で、励起波長と発光波長の差もおおよそ 50 nm と小さく、対物レンズの色収差は問題にならなかったことが分かる。

そこで我々はまず、色収差なく液体ヘリウム温度で使用できる対物レンズとして一体成型反射対物レンズを開発した[論文リスト 1]。国内の光学素子メーカーで試作を引き受けてくれる会社を探したところ数社見つかり、試行錯誤の後、最終的にこのうちの一社で完成にこぎつけることができた。製作した対物レンズを図2に示す。基本はCassegrainと俗称される、 O_M を共通の中心に持つ2枚の球面鏡から成る反射光学系である。冷却によってアラインメントが崩れるのを防ぐため、2枚の鏡は一塊の石英の内側に向けて作りこんである。光線が石英から出入りする界面は、屈折の影響を最小限にするために光線に垂直になっている。焦点 F は2枚の球面鏡の中心 O_M からちょうど焦点距離 f だけ離れている。焦点距離 f と2枚の球面鏡の曲率半径、 r と R の間には、

$$f : r : R = 1 : \sqrt{5} - 1 : \sqrt{5} + 1$$

という関係があり、最低次の球面収差がなくなるようになっている。

図2の対物レンズは基本的に反射光学系なので色収差は解決されている。最低次は消えているがまだ残っている高次の球面収差がレンズの開口数を制限している。収差は、回折限界のスポットサイズを超えなければ許容できる。回折スポットの大きさは波長に比例し、球面収差の大きさは幾何学的な光路のずれなのでレンズの大きさに比例する。このことから、より短波長で、より大きな開口数で使うにはレンズの大きさを小さくすればよいことが分かる[投稿中]。レンズの工作技術も確立してきたため、当初の半分の大きさの $f = 2 \text{ mm}$ のレンズを作ることができた。図3はこのレンズを用いて液体ヘリウム温度で撮影した直径 100 nm のビーズの散乱像である。レンズを全く動かさずに波長 360 nm から 960 nm まで使えることが分かる。レンズの特徴を活かして我々は最近緑色の蛍光を発するタンパク質 GFP の液体ヘリウム温度における二光子蛍光スペクトルの測定に成功した[論文リスト 3]。

5. 自己評価

研究期間中に、液体ヘリウム中で近赤外から紫外域まで使える対物レンズの開発に成功した[論文リスト 1]。当初の目標が、単一イオンの発光検出を利用した磁場中の単一核スピンの量子状態の観測であったことに照らし合わせると、光に関する部分の最大の技術的困難を克

服できたことになる。本来の目標に向けては、核スピンの制御と観測に関わる技術を確立させなければならない。たとえば、望み通りのゼーマン効果を生じさせるために、液体ヘリウム中の結晶試料に対して、顕微鏡の焦点にある一個の不純物サイトに1000ガウスのオーダーの磁場を特定の方向に1,2度の精度で加える技術、などが必要である。

一方開発した対物レンズは、低温の顕微分光の適用範囲を一気に可視の全域と紫外域に拡げるものである。液体ヘリウム温度で単一タンパク質の可視蛍光分光が可能であることを初めて示すことができた[論文リスト 3]。

6. 研究総括の見解

磁場中の単一核スピンの量子状態の観測を主たる目標としていましたが、最大のハードルを越えたようです。今後は、磁場の制御などの課題はあるものの着実に進むでしょう。その中で開発した低温の顕微分光用の対物レンズは世界オンリーワンであり、量子と情報の分野を超えた広い応用があり、すでに成果も出しています。この先の発展が楽しみです。さきがけ研究が有効に働いた好例と見ることができます。また、松下さんは優秀な若手をこの研究で育成しました。

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. S. Fujiyoshi, M. Fujiwara, C. Kim, M. Matsushita, A. M. van Oijen, and J. Schmidt, “Single-component reflecting objective for low-temperature spectroscopy in the entire visible region”, *Applied Physics Letters* 91 (2007) 051125.
2. H. Oikawa, S. Fujiyoshi, T. Dewa, M. Nango, and M. Matsushita, “How Deep Is the Potential Well Confining a Protein in a Specific Conformation? A Single-Molecule Study on Temperature Dependence of Conformational Change between 5 and 18 K”, *Journal of the American Chemical Society* 130 (2008) 4580.
3. S. Fujiyoshi, M. Fujiwara, and M. Matsushita, “Visible Fluorescence Spectroscopy of Single Proteins at Liquid-Helium Temperature”, *Physical Review Letters* 100 (2008) 168101.

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

1. 藤原 正規、藤芳 暁、松下 道雄, “一体成形反射型対物レンズの開発”, 分子構造総合討論会 2006, 2P112.
2. 藤原正規、藤芳暁、松下道雄, “一体成形反射型対物レンズを用いたヘリウム温度における散乱イメージング”, 日本物理学会 2007 年春季大会, 21aZB-13.
3. 藤原正規、藤芳暁、松下道雄, “1.5K で使える反射対物レンズの球面収差及び色収差の改善”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 23pYD-5(2008).
4. 吉弘達矢、平野充遙、藤芳暁、松下道雄, “低温固体中の単一イオンの発光検出に向けた可視顕微分光システムの開発”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 20pZA-5.

⑥招待講演
なし

【B その他の主な成果】

①論文
なし

②特許出願
なし

③受賞
なし

④著書
なし

⑤学会発表
なし

⑥招待講演
なし

研究課題別評価書

1. 研究課題名

新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御

2. 氏名

遊佐 剛

3. 研究のねらい

分析技術として広く用いられている核磁気共鳴(NMR)は、原子核の持つ核スピンという量子力学的な性質をうまく制御、検出することで発展してきた。従来広く用いられているNMR法は、マクロな数の核スピンを検出するには非常に優れた手法であるが、少数(10^8 個程度)の核スピンを検出するのは困難である。そこで本研究では、従来のNMRとは異なる新たなNMR手法を用いて、ナノ領域の少数核スピンを操り、電子や光と融合させることで、核スピンを用いた新たな計測技術の確立と量子機能デバイスの実現に向けた研究を目指した。

4. 研究成果

NMR法が分析、計測技術として広く応用できる理由の一つとして、核スピンは電子など他の量子系に比べて、外界との相互作用が少なく、量子力学的な状態を保持出来る時間(コヒーレンス時間)が、圧倒的に長いため、外界の擾乱にかき消されることなく、物質内部の核スピンの情報を高分解能に外部に取り出すことが出来ることが挙げられる。通常のNMRは、パルスNMR、多次元NMRなど非常に高度な発展を遂げているが、物質内部から得られる核スピンの情報(核磁気誘導信号)が微弱で、感度が低いという欠点があり、溶液中の分子構造などは特殊な場合は別にして、マイクロなスケールの物質の検出には適していなかった。また、固体を測定対象とする場合、固体試料を機械的に高速で回転させるマジックアングルスピンニング(MAS)という手法を用いなければ、固体のNMRそのものの検出も容易ではない。静磁場を印可する方向を z 軸としたとき、通常のNMRは、静磁場と直交する xy 面内の磁化(M_{xy})を核磁気誘導という方法で検出しているが、本研究では、固体に存在する電子と核スピンの結合によって、静磁場と平行の磁化成分(M_z)を検出するNMR法について注目し、半導体ナノ構造中に存在し、通常のNMRでは検出出来ない程度の少数核スピンの量子状態の制御および検出に向けた研究を行った。

本研究では、核スピンの z 方向の磁化を観測する手法として、抵抗検出、光学検出という二つの手法を用いたので、それぞれについて説明する。

(1) 抵抗検出 NMR による核磁気イメージングに関する研究

図1のような GaAs/AlGaAs 半導体で構成されるデバイスに、さらに局所領域の核磁気イメージングを行うための磁場ゲートを配置させた試料の顕微鏡写真を図2に示す。金色に見える部分が金属性のゲートである。上下左右2対の磁

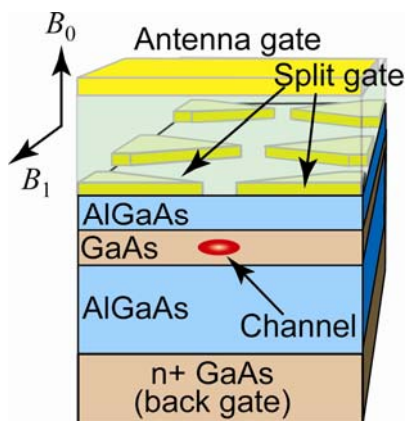


図1. ポイントコンタクトを3つ並べたNMRデバイスの構造図。

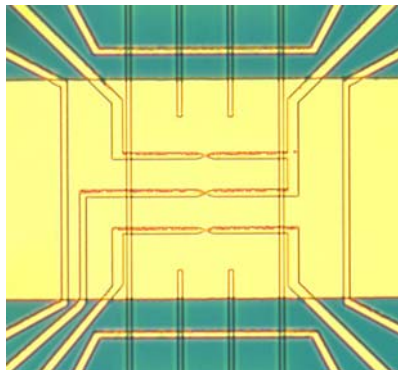


図2. ポイントコンタクトを3つ直列に並べたNMRデバイスの顕微鏡写真。

場ゲート(電極の幅は $1\mu\text{m}$ 程度)により、磁場勾配、及びオフセット磁場をパルス的に印可させ、広い領域を覆うアンテナゲートにより、RF 電磁場を印可することができる構造となっている。なお緑色に見える部分は絶縁層である。

このデバイスに対して、位相の 90 度ずつ異なる 4 種のパルスが 6 つ連続した RF パルス列および電流パルス列を印可することによって、ある特定の領域のみの核磁気共鳴を行うことができ、電流を掃引すると、イメージングすることができる。この場合、観測出来る領域の大きさは磁場ゲートに印可される電流値によって決定される。また、これら一連のパルス操作は核スピンのコヒーレント時間内に終了させなければならない。RF パルスの位相の精度やパルスのスイッチングとタイミングの精度によって、分解能が大きく左右されるため、RF パルスのタイミングと立ち上がり時間についての検討を行い、パルスの切り替え時間は約 80ns 程度で、およそパルス全体の 1% 以下の精度となっていることを確認した。

磁場ゲートに電流 I_B を印可し、NMRの共鳴スペクトルがどのように変化するか測定するために、実際のデバイスを低温強磁場下 ($T < 0.1\text{ K}$, $B_0 = 6.3\text{ T}$) に置き、核スピンと電子スピンの結合が顕著に現れる分数量子ホール状態(ランダウレベル占有率 $\nu = 2/3$) において、電気伝導測定を行った。なお測定は連続発振(CW)のRF電磁波を外巻きコイルに導入し、 I_B もCWの条件下で半導体を構成している ^{75}As の核スピンに共鳴するように、RF周波数を設定して測定した。また 4 つある磁場ゲートの内の中の一つ(下磁場ゲート)に I_B を流している。図 3 は、横軸がRF電磁波の周波数、縦軸はデバイスの電気抵抗を示しており、 $45.78 \sim 45.79\text{ MHz}$ 近傍で、共鳴が観測された。図 5 に示すように、 I_B を印可することで共鳴ピークがブロードになっていくことが確認された。このデータを元に、共鳴スペクトルの半値幅をプロットしたものが図 4 である。 I_B の電流量にほぼ比例して半値幅が増大していく様子が分かる。また、 $I_B = 0$ の時に比べて、 I_B を印可したとき、共鳴の半値幅がどの程度変化するか、幅の広がりの変化量(周波数)を、 ^{75}As の磁気回転比 γ で換算した値(磁場)を右 y 軸に表示した。現在のところ核スピン偏極の空間的な制御が十分でなく、場所が特定出来ないため、詳細については不明であるが、この測定では、磁場ゲートに $I_B = 80\ \mu\text{A}$ を印可したときに、共鳴スペクトルの広がりはおおよそ 1 mT 程度の磁場が印可されたことに相当していると推測される。

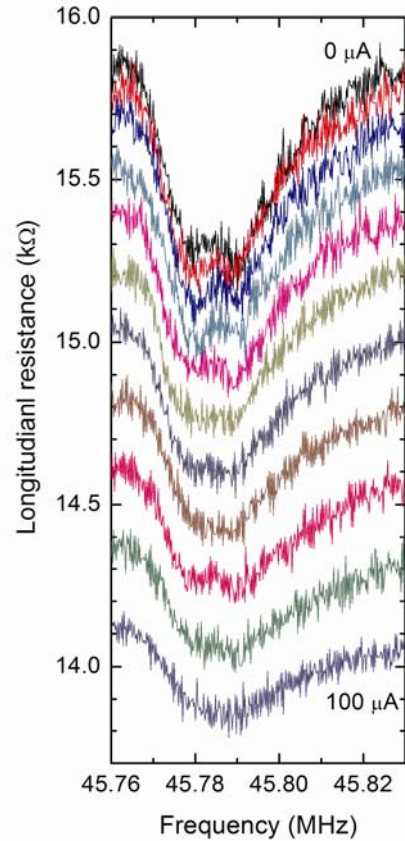


図 3. 磁場ゲートに電流 $I_B = 0$ から $100\ \mu\text{A}$ まで $10\ \mu\text{A}$ 刻みで変化させ、印可したRF電磁波の周波数を掃引した際に得られる縦抵抗の変化。

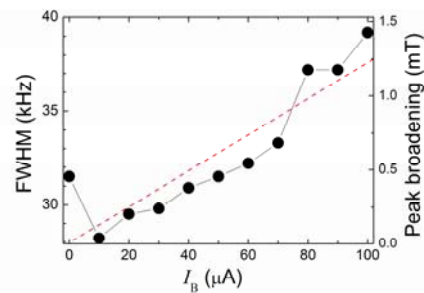


図 4. 磁場ゲート印可電流 I_B に対する共鳴ピークの半値幅の変化。

(2) 光検出 NMR に関する研究

先に述べたように、抵抗検出以外にも、核磁化の z 成分を検出する手法として光検出 NMR の手法がある。半導体からのフォトルミネッセンス(PL)のピークエネルギーが核磁化によって変化することを利用した NMR 法や、パルスレーザーを使った NMR の手法などが研究されている。本研究では抵抗測定と光検出を組み合わせた同時測定を行うとともに、量子ホール状態の電子物性についての研究も行った。光検出 NMR で用いた測定試料は、抵抗検出 NMR で用いた試料と同じ半導体ウエハであるが、簡単のため、スプリットゲートなどのナノ加工する前の状態のものを用いた。

光検出 NMR に用いた光学測定装置の構成図を図 5 に示す。希釈冷凍機に励起光導入と集光用に別々の光ファイバーを導入し、試料近傍に波長板などの偏光器を設置した。試料からの発光は集光用ファイバーから高分解能分光器に導入され、冷却 CCD により、偏光依存の PL スペクトルが測定できる。なお、励起用レーザーは波長可変で、励起光の偏光も制御可能なシステムを構築した。

図 6 に典型的な PL と抵抗の同時測定を図を示す。(a) が試料からの PL スペクトルで、明るい色の部分が発光を示している。測定温度は 60 mK、励起光強度は 0.5 mW 程度、波長は 760 nm、試料に印可した電流は 100 nA である。磁場を印可していくと、低磁場側で高次のランダウレベルのスペクトルが磁場に比例して高エネルギー側にシフトしていき、さらに磁場を増加させると、徐々に高次の側からランダウレベルからの発光が消えて行く様子が明瞭に観測できた。さらに磁場を増加させ、ランダウレベル占有率(ν)が 2 以下になると、基底準位である最低ランダウ準位からの発光が急激に強くなる。また、 $\nu=1$ と $\nu=2/3$ と思われる $B_0=5$ T 近傍では発光強度が弱くなっていることが分かる。また図(b)に示すように、励起光照射時でも、抵抗測定が可能で、縦抵抗に弱磁場での SdH 振動と、量子ホール効果が確認できる。なお、整数の量子ホール状態でも縦抵抗が完全に 0 にならないのは、励起光照射によって光励起されたキャリアによる伝導(photoconductivity)が存在するからであると考えられる。

5. 自己評価

核スピンの縦磁化を検出する手法を進展させ、ナノ領域の核スピンの量子状態を電氣的、あるいは光学的に制御検出する技術の確立が本研究の目標であった。研究期間では論文と特許出願数件が成果として得られた。測定装置立ち上げなどに時間がかかったこともあり、研究成果は目標に対して十分であったとは言えない点もあるが、目標達成にかなり近いところまで到達した点は評価できる。また、本研究の目標達成に至る段階で、多くのノウハウや知見が蓄積できたことは今後の本研究の発展あるいは応用を考える上で重要な成果であると考えられる。

6. 研究総括の見解

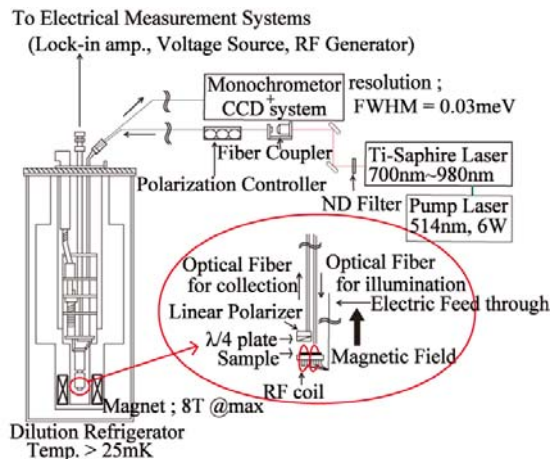


図 5. 光学測定装置の構成図

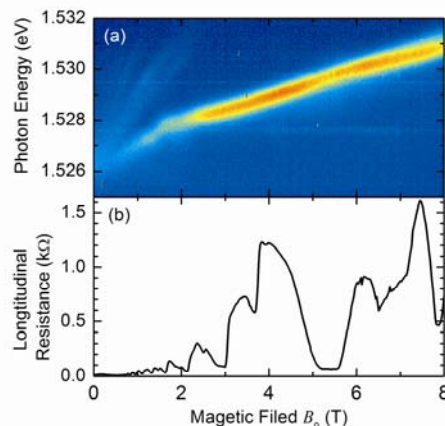


図 6. (a) PL スペクトルおよび(b)ホール測定による縦抵抗の磁場依存性。

核スピンの縦磁化を検出し、ナノ領域の核スピンの量子状態を光学的に制御する技術の確立に向けて、橋頭堡を築いたと思います。その研究の拠点をさががけ研究により立ち上げたことは、日本におけるこの分野の将来にとって重要であると思います。後継者も育ちつつあるようです。

7. 主な論文等

【A さががけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

1. T. Ota, N. Kumada, G. Yusa, S. Miyashita, T. Fujisawa, Y. Hirayama, "Coherence time of nuclear spins in GaAs quantum well probed by submicron-scale all-electrical nuclear magnetic resonance device", Jpn. J. Appl. Phys. 47 3115 (2008).
2. T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Decoherence of nuclear spins due to dipole-dipole interactions probed by resistively detected nuclear magnetic resonance", Appl. Phys. Lett. 91 193101 (2007).
3. T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Nuclear spin population and its control toward initialization using an all-electrical submicron scale nuclear magnetic resonance device", Appl. Phys. Lett. 90 102118 (2007).
4. K. Muraki, G. Yusa, Y. Hirayama, "Nuclear spin manipulation in semiconductor nanostructures", Proceedings of the International Society for Optical Engineering 6800 H-1-8 (2007).

②特許出願

研究期間累積件数: 3 件

1. 発明者: 遊佐 剛

発明の名称: 核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用いた撮像システム、撮像方法

出願人: 独立行政法人科学技術振興機構

出願日: 2006年11月30日(特願 2006-324443)

2. 発明者: 遊佐 剛

発明の名称: 核磁気共鳴撮像システム、及び撮像方法

出願人: 独立行政法人科学技術振興機構

出願日: 2007年5月31日(特願 2007-145488)

3. 発明者: Go Yusa

発明の名称: 核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用いた撮像システム、撮像方法

出願人: Japan Science and Technology Agency

出願日: 2007年11月30日(PCT/JP2007/073138)

③受賞

なし

④著書、解説

1. 遊佐剛「量子ホール系と核スピン」パリティ 2008年1月

⑤学会発表

1. 早川純一郎、川村昂、L. H. Rossander, 桑野信、小野満恒二、宮下宣、藤澤利正、遊佐剛、「 $n=2/3$ 分数量子ホール状態における核スピン偏極の光検出」日本物理学会 2008年秋季大会, 20pYK-9
2. 川村昂、早川純一郎、小野満恒二、宮下宣、藤澤利正、遊佐剛、「量子ホール状態を用いた局所的 NMR」日本物理学会 2008年秋季大会, 23aQG-1
3. T. Ota, N. Kumada, G. Yusa, S. Miyashita, and Y. Hirayama, "Nuclear quadrupolar interaction in a GaAs quantum well probed by resistively-detected NMR",

International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI2007).

4. 太田剛、熊田倫雄、村木康二、遊佐剛、宮下宣、平山祥郎、「GaAs 核スピン高偏極デバイスにおける核四重極相互作用」、日本物理学会 2006 年秋季大会, 25pXL-4.
5. T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, K. Muraki, S. Miyashita and Y. Hirayama, "Study of nuclear quadrupolar interaction using a novel all-electrical GaAs NMR device", International Symposium on Compound Semiconductors 2006.

⑥招待講演

1. G. Yusa, "Resistively detected NMR in semiconductor nanostructures", Indian Institute of Science Centenary Symposium on Future Directions in NMR 2008, Bangalore, India (Oct. 2008).
2. G. Yusa, K. Muraki, Y. Hirayama, "Controlled multiple quantum coherences of nuclear spins in a nanoscale device", International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, Genova, Italy (July 2007).
3. G. Yusa, "Resistively detected NMR in a nanoscale device and direct detection of multiple quantum coherences", Gordon Research Conference Magnetic Resonance, New England, U.S.A. (June 2007).
4. G. Yusa, "Coherent manipulation of nuclear spins in a monolithic semiconductor device", Gordon Research Conference Quantum Information Science, Lucca, Italy (April 2007).
5. G. Yusa, K. Muraki, K. Takashina, K. Hashimoto, and Y. Hirayama, "Nuclear spin control by a point contact", 28th International Conference on the Physics of Semiconductors, Vienna, Austria. (July 2006).

【B その他の主な成果】

①論文

1. F. Boxberg, J. Tulkki, G. Yusa, and H. Sakaki "Cooling of radiative quantum-dot excitons by terahertz radiation: A spin-resolved Monte Carlo carrier dynamics model", Phys. Rev. B 75 115334 (2007).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

なし