

「量子と情報」研究領域 領域活動・評価報告書

—平成19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」領域に設けた領域アドバイザー10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・年齢など特に考慮せずに選考したが、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	35 名	10 名	5 名

5. 研究実施期間

平成16年10月～平成20年3月

6. 領域の活動状況

領域会議:7回

研究終了報告会: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19年11月	研究報告会開催
平成20年2月	研究課題別評価書及び研究報告書提出
平成20年3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

量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究(池上弘樹 研究者)

液体ヘリウムの表面にトラップされた電子の量子準位を量子ビットとして利用するための基礎技術を開発した。この系の特徴はデコヒーレンス時間が非常に長いことである。その実現には、ヘリウム薄膜上の電子を $1\mu\text{m}$ 以下の面内領域に閉じ込める技術の確立、単一電子の量子状態を検出する技術の確立、マイクロ波により電子の量子状態をコントロールする技術の確立などが必要である。

そのために、幅 $5\mu\text{m}$ の 1 次元チャネルの伝導度 $15\mu\text{m}$ および $5\mu\text{m}$ チャネルでの伝導度測定を通じて、ヘリウム薄膜上に閉じ込められた電子の性質を解明した。閉じ込めサイズが $5\mu\text{m}$ とまだ少し大きい、ヘリウム薄膜上の電子を確実に長時間安定にトラップすることができ、 $5\mu\text{m}$ チャネル中では閉じ込めの効果が現れ、その性質も定性的に理解でき、単一電子の閉じ込めを実現出来るという手ごたえを得た。

超伝導クーパ対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発(趙福来 研究者)

ノイズ測定のため開発した極高真空低温電界電子放出顕微鏡の圧力は実験を行うシステムとしては記録的な $3 \times 10^{-10}\text{Pa}$ を達成した。しかも不純物による電流の揺らぎも極めて少なく、装置に W(111) 針を搭載して極高真空下で行ったショットノイズ測定は 10Hz 以下であるという低周波測定記録を達成した。さらに装置の極高真空環境を利用して電界電子放出現象を応用した極高真空領域の圧力測定法を開発した。現在はナノ電子源から放出される電子ビームの電流ノイズの変化を測定している。

目的の超伝導クーパ対には達しなかったが、そのための基礎技術について大きな成果を上げた。

光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究(長谷川祐司 研究者)

おそらく世界でも数少ない中性子干渉計を用いた量子力学の基本原理に関する数々の実験を行い多くの成果を上げた。その大部分は中性子の経路とスピンをそれぞれキュービットとして扱うが、最近ではさらにエネルギーの自由度もとり入れて 3 キュービットとしている。Kochen-Specker の定理の破れ、GHZ 状態の実験、幾何学的位相(ベリー位相)など多岐にわたっている。

中性子という特徴のある系について、量子力学の基本的研究の有用性はこれからもあると思われる。

代数的量子情報処理技術の研究(濱田充 研究者)

量子計算機の実現に向けた新しい量子誤り訂正符号の提案、設計、開発、性能解析を古典符号とシンプレクティック符号の類似性を利用し、古典で知られている符号設計の方法論に根ざした方法でシンプレクティック符号の設計を行った。

この方針に基づき主要成果として、代数的量子誤り訂正符号の一般的構成法と一般的構成法を用いた高性能な代数的量子誤り訂正符号の明示的構成に成功し、情報セキュリティへの応用と解析を行った。

この研究は、この分野に本質的な貢献をしている。

量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性(森越文明 研究者)

量子計算では異なる計算ステップ間の相関が、何らかの形で古典計算の場合よりも強いのではないかというアイデアのもとに、空間における Bell 不等式に習って、ある種の時間における Bell 不等式の破れの形で、量子計算を特徴づけた。

Leggett-Garg 不等式に端を発する「時間における Bell 不等式」の概念を、Braunstein と Caves によって提案された条件付きエントロピーに対する情報理論的 Bell 不等式の形で定量化し、量子計算における Grover のアルゴリズムに対して確かに破れていることを示した。このことは量子計算のみならず量子力学の理解のうえで極めて示唆的である。この領域から、概念的に新しいことが提案されたことは特筆に値する。

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 *1 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 東北大学 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 研究マネジャー
 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

*1 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	1	31	32
口 頭	25	35	60
その他	5	1	6
合 計	31	67	98

※平成 20 年 3 月現在

(2) 特許出願件数

国 内	国 際	計
2	1	3

(3) 受賞等

なし

(4) 招待講演

国際 5 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)
池上 弘樹 (兼任)	量子ビット構築へ向けての ヘリウム液面電子量子ドットの研究 (理化学研究所 中央研究所)	理化学研究所 中央研究所 専任研究員 (同上 研究員)	33
趙 福来 (専任)	超伝導クーパー対を使用した 電子 EPR 対高密度ビームの開発 (早稲田大学 各務記念材料技術研 究所)	科学技術振興機構 専任研究員 (早稲田大学 各務記念材料技術研 究所 客員講師)	41
長谷川 祐司 (専任)	光学実験を手段とした量子情報処理 のための量子力学的物理現象の研究 (Atomic Institute of the Austrian Universities)	科学技術振興機構 専任研究員 (Atomic Institute of the Austrian Universities Research-assistant)	49
濱田 充 (兼任)	代数的量子情報処理技術の研究 (玉川大学 学術研究所)	玉川大学 学術研究所 准教授 (科学技術振興機構 ERATO 今井 プロジェクト 研究員)	21
森越 文明 (兼任)	量子非局所性を用いた 情報処理における不可逆性 (日本電信電話(株) NTT 物性科学基 礎研究所)	日本電信電話(株) NTT 物性科学基 礎研究所 研究主任 (同上 研究員)	12

研究課題別評価書

1. 研究課題名

量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究

2. 氏名

池上弘樹

3. 研究のねらい

量子コンピューターの実現に向けた研究が近年活発に行われている。その基本素子である量子ビットとして多くの提案がなされているが、その中でもユニークなものとして、液体ヘリウムの表面にトラップされた電子を利用するというものがある。電子を液体ヘリウム表面に近づけると、ヘリウム中にできる電子の鏡像電荷のため、電子は液面からの距離に反比例した引力ポテンシャルを感じ、ヘリウム表面にトラップされる。そのため液面に垂直方向の運動は量子化され束縛準位 (Rydberg states) ができる。その基底状態 ($|0\rangle$) と第一励起状態 ($|1\rangle$) を量子ビットとして利用するというものである。この系の最大の特徴は、電子は孤立しデコヒーレンス時間は非常に長くなると予想されているという事である。これは、液体ヘリウム表面は不純物が全く存在しない清浄表面であること、また電子はヘリウム表面上の真空中に浮かんでいるということに因る。また、ヘリウム上の2次元電子系はクリーンで単純なシステムであるため実験と理論の一致が非常に良く、その性質は良く理解されている。そのため、実験的に取り扱いづらい対象ではあるものの、量子コンピューターの黎明期である今日では、量子物理の基礎研究を行う上で、あるいは量子コンピューターの実験的問題点を洗い出す上で恰好の研究対象である。

しかしながら、ヘリウム上の電子を用いた量子ビットは実現されていない。その実現には、ヘリウム薄膜上の電子を $1\ \mu\text{m}$ 以下の面内領域に閉じ込める技術の確立、単一電子の量子状態を検出する技術の確立、マイクロ波により電子の量子状態をコントロールする技術の確立など克服すべき課題がある。しかしこれらの課題は、最先端の技術でもって一歩ずつ確実に歩んでゆけば克服可能なものであり、十分に追求する価値のあるシステムである。

本研究の目的は、量子ビット実現に不可欠な、ヘリウム液面上の単一電子を $1\ \mu\text{m}$ 以下の狭い領域に閉じ込める(量子ドット)技術を確認すること、および閉じ込められた電子の性質を解明することである。具体的には、第一目標として、一方向のみ閉じ込めた1次元伝導チャネルを実現し、その伝導特性の解明をおこなう。1次元伝導チャネルを実現することは、狭い領域に電子を閉じ込めるための基礎技術の確立として重要である。まずはチャネル幅が広い電極を作製することにより、電子をヘリウム薄膜上に安定に蓄えるテクニックを身につけ、その後、チャネル幅を細くしていくという方針で研究を進める。その後、第二目標として、1次元伝導チャネルの途中に量子ドットを埋め込んだシステムを構築することを目指す。量子ドットを介した伝導度を測定することにより、量子ドット中の電子の特性を解明する。これらの情報をもとに、より現実的な量子ビットのデザインや、量子状態の読み出し方法などを新たに提案することが第三の目標である。

4. 研究成果

1. 1次元チャネル伝導度測定用電極の開発

本研究では、まず1次元チャネルに閉じ込められた電子の伝導度の測定技術の確立を目指した。ヘリウム上の電子には直接配線を付けることが出来ないため、伝導度を測定するためには電極を特殊な構造にする必要がある。本研究では、図1(a)のような2層構造の電極を用いた。下側電極は伝導度測定用、上側電極は電子を面内に閉じ込めるためのものである。電極には溝が掘ってあり、そこに毛管凝縮したヘリウム薄膜上に電子を蓄える。2層間の絶縁体には、本研究の初めの段階では、加工が比較的容易なフォトレジストを使用した。しかしフォトレジストを用いた電極は、室温と低温の間の熱サイクルに弱く、電極の安定度、データの再現性において問題があった。また電極によっては、電子が液体ヘリウム上からゆっくり逃げていくものもあった。そこで絶縁体を SiO_2 に変えて電極を作製した。 SiO_2 の熱収縮率は金属に近いいため熱サイクルに対して安定で

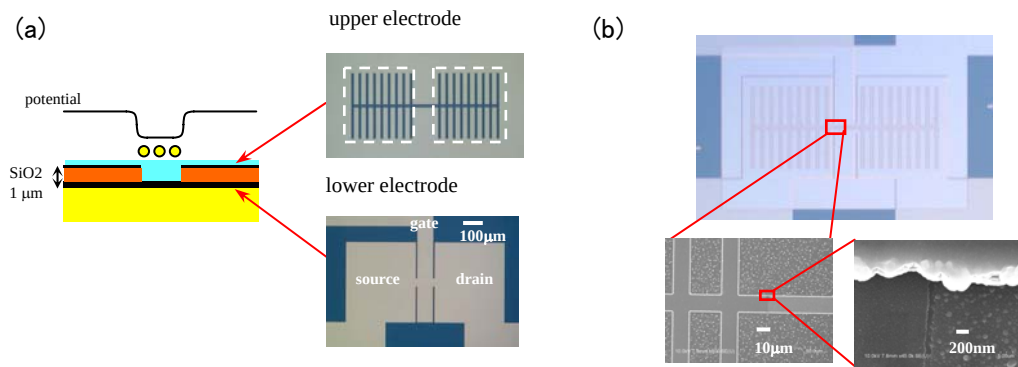


図1 (a)電極構造。(b)チャネル幅 15 μm の電極の写真。

あると予想されるが、 SiO_2 を用いると電極作製のプロセスは複雑になる。

図1(b)に SiO_2 を絶縁層として作製したチャネル幅 15 μm の電極の写真を示す。電極は2層構造になっており、下側電極、上側電極ともにアルミニウムでできている。幅 15 μm の溝が掘っており、そこに毛管凝縮した液体ヘリウム上に電子は蓄えられる。 SiO_2 膜はプラズマCVDで作製した。溝構造部分の作製にはReactive Ion etching(RIE)を用いた。RIEでは SiO_2 のみ選択的にエッチングされ、アルミニウムはエッチングされない。そのため、上側電極(アルミニウム)が無い所だけ SiO_2 が除去され溝構造が出来る。図1(b)から分かるように、チャネル幅のゆらぎは 200nm程度であり、均一と考えてよい。

図1(b)の中心部分が 1 次元チャネルである。チャネルの両側にあるチャネルに垂直な10本程度の溝は、下側電極と電子系との結合を強くするための、いわばアンテナの役割を果たす。下側電極の中心部分にはゲート電極が作られている。ゲート電極にかかるバイアス電圧を調節することにより、ゲート電極上の電子密度をコントロールすることが可能であり、またこれによりチャネルを流れる電流の大きさを制御することが出来る。

電子は電極より 3mm 上に取り付けられているタングステン・フィラメントを瞬間的に加熱することにより放出され、下側電極に正のバイアスを印加することによりヘリウム上に溜めることが出来る。上側電極には負のバイアスが印加されており、電子はチャネル中に閉じ込められる。測定した全ての電極において、測定を行なっている間(～数日間)では電子は逃げていくことは無かった。また、室温と低温の往復を何度か繰り返した後でも問題なく測定でき、熱サイクルに対し安定であることが実証できた。なお本研究では、幅 15 μm と 5 μm のチャネルを作製し測定した。以下に、幅 15 μm と 5 μm のチャネルで得られた電子の伝導度の結果を説明する。

2. 幅 15 μm の 1 次元チャネルの伝導度

幅 15 μm のチャネル中を流れる電流のゲート電圧による制御の様子を図2に示す。まず電子をトラップするために、初期状態ではゲート、ソース、ドレインには+0.25Vの電圧が印加されている。この状態から、ゲート電圧のみを小さくしていくと、ゲート上から電子がいなくなる。そのため電流はあるゲート電圧で遮断される。すなわち、電界効果トランジスタと同様に流れる電流の大きさを制御することができる。また、遮断ゲート電圧(V_G^C)の大きさから、電子密度(n)を決定することが出来る。

次に、幅 15 μm チャネル中の電子の抵抗の温度依存性を図3に示す($n=1.14\times 10^{13} \text{ m}^{-2}$)。温度を下げていくと電気抵抗は減少し、約 0.75K以下で急激に上昇することが観測された。

バルクヘリウム上の電子では、電子の移動度は 1K 以上ではヘリウムガスとの散乱、1K 以下ではリブロン(ヘリウム表面波)でリミットされることが知られている。これらの散乱体の密度は温度の低下とともに減少するため、低温では抵抗は小さくなる。これらヘリウムガスおよびリブロンとの散乱を取り入れたバルクヘリウム上の電子の抵抗の理論曲線を図3に示す。理論曲線は2倍程度のファクターを掛けることにより高温部分の実験データを完全に再現することが出来る。バルクヘリウム上の電子の場合にも2倍程度ずれることが知られており、幅 15 μm のチャネル

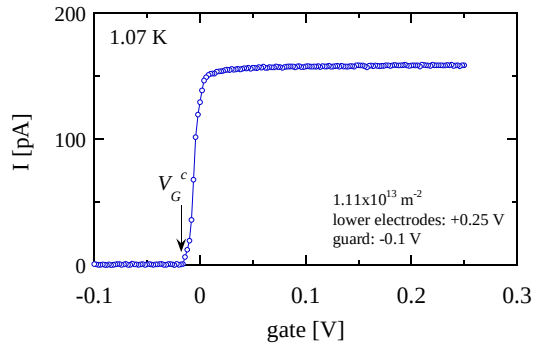


図2 15 μm チャンネルを流れる電流のゲート電圧による制御。

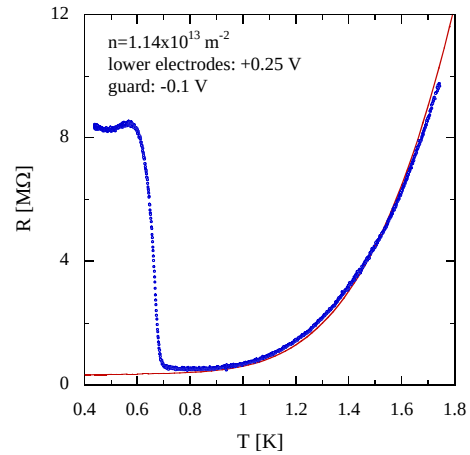


図3 15 μm チャンネルにおける抵抗の温度依存性。赤線は理論曲線。

ル中においても、電子の散乱はバルクヘリウム上の電子と同じメカニズムであることが分かる。

バルクヘリウム上の電子は低温では、電子間の強いクーロン斥力のため電子自身が結晶を組んだウィグナー結晶に転移する。転移温度は電子密度で決まり、クーロン相互作用と運動エネルギーの比 Γ (プラズマ・パラメーター) が約 130 になった時に起こることが知られている ($\Gamma = U/K$, $U = e^2/(\pi m)^{1/2}/4\pi\epsilon_0$ はクーロン相互作用, $K = k_B T$ は運動エネルギー)。図3の 0.75 K 付近の抵抗の上昇は $\Gamma \sim 130$ と対応しており、ウィグナー結晶への転移であると考えられる。ウィグナー結晶相では電子は局在するため、ヘリウム表面を局所的に押す。そのためヘリウム表面には、dimple lattice と呼ばれる電子の格子の周期に対応した周期的な凹凸が出来る(図4)。ウィグナー結晶を水平に動かすと電子はdimple latticeを引きずって動くため、電子の有効質量は大きくなり抵抗は増大する。バルクヘリウム上では転移の際に抵抗の不連続なジャンプが見られるが、15 μm チャンネル中では転移はシャープではあるが不連続なジャンプは見られない。5 μm チャンネルの結果の所で述べるが、これはチャンネル幅方向の有限サイズの影響が出てきたためと考えられる。

ウィグナー結晶転移温度(T_m)の密度依存性を図5に示す。どの密度においてもウィグナー結晶転移はバルクヘリウム上の電子と同様に $\Gamma \sim 130$ で起こる。すなわちチャンネル幅方向が有限サイズであることの転移温度に対する影響は小さいことがわかる。測定を行なった密度領域ではチャンネルの間に電子が 30~50 個存在し、チャンネル幅の影響が現れるためには、チャンネル幅はまだ大きすぎると考えられる。しかしながら、抵抗の高温部分の温度依存性がバルクヘリウム上

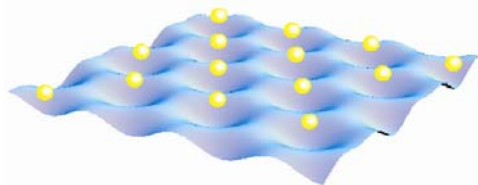


図4 ウィグナー結晶。電子は局在するのでヘリウムの表面には周期的な凹凸(dimple lattice)が出来る。

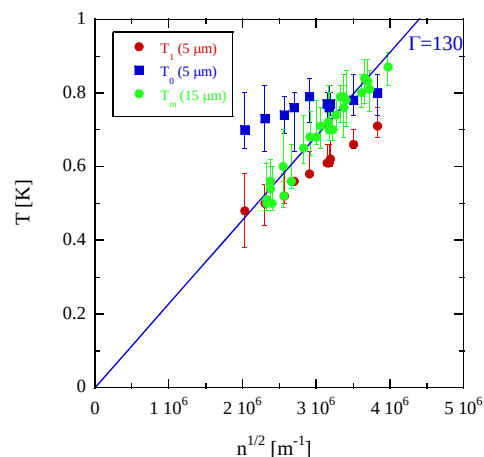


図5 15 μm チャンネルにおけるウィグナー結晶(T_m)の密度依存(緑●)、および 5 μm チャンネルにおける T_0 (赤●)、 T_1 (青■) の密度依存。

の電子に対する理論でよく再現できること(図3)、およびウィグナー結晶転移温度がバルクヘリウム上の電子のものと一致すること(図5)から、1次元チャンネルの伝導度の信頼できる測定方法を確立したと結論できる。

3. 幅 5 μm の 1 次元チャンネルの伝導度

図6に幅 5 μm チャンネル中の電子の抵抗の温度依存性を示す。図には 15 μm チャンネル中の抵抗(電子密度がほぼ同じもの)も比較のために示してある。高温部分の温度依存は 15 μm チャンネル同様、ヘリウムガスおよびリブロンとの散乱で説明できる。一方低温では、幅 5 μm チャンネルの抵抗はバルクヘリウム上のウィグナー結晶転移温度よりも高温からゆっくり上昇しはじめ、バルクヘリウム上の転移温度付近から急激に大きくなる。これは、バルクヘリウム上の転移温度より高温ですでにウィグナー結晶になっていることを示唆する。

抵抗が極小になる温度を T_0 、急激に大きくなる温度を T_1 (急激に大きくなり始める温度の目安として、低温部分の抵抗の温度依存を外挿して極小を通る水平線と交わる温度を採用。図6参照)として、これらの電子密度依存を図5に示す。密度が小さくなるにしたがって、 T_0 は $T \sim 130$ から高温側にずれていき、また T_0 と T_1 の差は大きくなる。

このような 5 μm チャンネルの抵抗の温度依存は以下のように解釈できる。バルクヘリウム上でのウィグナー結晶への転移は、dislocation対の束縛によるKosterlitz-Thouless転移で理解されている。転移温度より高温で短距離の相関ができ、温度が下がるにしたがって相関長はのびる。相関長が無限大になった時にバルクヘリウム上ではウィグナー結晶転移する。チャンネル中では相関長がチャンネル幅程度になった時($T=T_0$)、チャンネル幅程度の領域で秩序ができ抵抗はゆっくり上昇しはじめ、相関長がチャンネルの長さ程度(ほぼバルク)になった時($T=T_1$)、完全な結晶になり抵抗が急激に上昇すると考えられる。このシナリオでは、格子間隔 $n^{-1/2}$ ($\sim$ dislocationの大きさ)とチャンネル幅 W の比 $n^{1/2}W$ (チャンネル幅方向の電子のおおよその個数)が重要なパラメーターであり、 $n^{1/2}W$ が小さくなるに従い T_0 と T_1 の差は大きくなることが予想される。これは図5の結果と一致する。

以上、15 μm および 5 μm チャンネルでの伝導度測定を通じて、ヘリウム薄膜上の電子を閉じ込める技術の開発および閉じ込められた電子の性質の解明ということを目指して研究を行った。閉じ込めサイズが 5 μm とまだ少し大きいのが、ヘリウム薄膜上の電子を確実に長時間安定にトラップすることができるようになった。また 5 μm チャンネル中では閉じ込めの効果が現れ、その性質も定性的にはあるが理解できた。この先一歩ずつ進んで行けば必ず単一電子の閉じ込めを実現出来るという手ごたえを得た。

5. 自己評価

本研究の第一目標は1次元チャンネルを実現しその伝導特性を解明すること、第二目標は1次元伝導チャンネルの途中に量子ドットを埋め込んだシステムを構築し、量子ドット中の電子の性質を解明することであった。ここで1次元チャンネルの幅として1~2 μm を想定していた。3年間の研究期間では、幅 5 μm のチャンネルまでを実現しその伝導特性を解明したが、第一目標である 1 μm のチャンネルまでには至らなかった。これは、当初の研究計画が欲張りすぎたという面に加え、チャンネル開発の方法としてチャンネル幅が大きいものから作り、データを確認しながら順次、幅を細くしていくというやり方を取ったためでもある。これは技術開発を確実に進めたいからであった。最初から

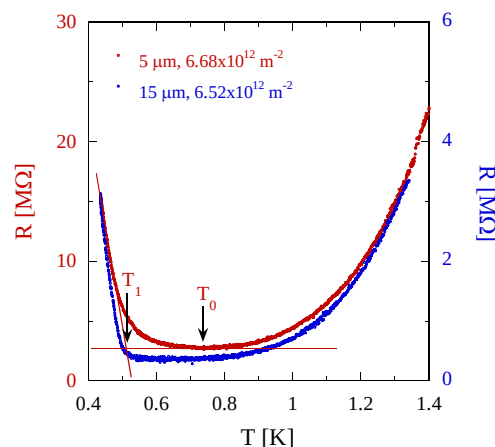


図6 チャンネル幅 5 μm (赤)における抵抗の温度依存。比較のために幅 15 μm の結果(青)も示す。 T_0 は抵抗が極小になる温度、 T_1 は抵抗が急激に大きくなる目安の温度。

1 μm 程度の幅のチャンネルを開発するという方法をとることによりもっと早く開発出来た可能性もあるが、試行錯誤が必要な技術開発の段階ではあまり得策では無い。3年間で幅 5 μm のチャンネルまで確実に作製・測定出来るようになったことにより、技術基盤を固めることが出来た。このことは、近い将来、1 μm 程度のチャンネルや量子ドットを実現出来るという確信につながった。

幅が大きいチャンネルを研究する過程で、チャンネル中の電子のウィグナー結晶転移が有限システムでの KT 転移であることに気が付いた。これは、ヘリウム液面電子系においてメゾスコピックなシステムが示す現象の研究として先鞭をつけた研究であると位置付けられる。今後、チャンネル幅を系統的に変えて測定していくことにより、有限システムでの KT 転移に関する理解が深まるであろう。本研究による技術基盤を用いることにより、量子情報の研究にとどまらずメゾスコピック系での現象の研究も可能になり、メゾスコピック系、低次元系などヘリウム液面電子系においての研究に広がりが見られると予想される。不純物の影響を受けないきれいな系であるという特徴を生かして、将来、新たな領域を作る気持ちで研究を展開していきたいと考えている。

6. 研究総括の見解

幅 5 μm の 1 次元チャンネルの伝導度 15 μm および 5 μm チャンネルでの伝導度測定を通じて、ヘリウム薄膜上に閉じ込められた電子の性質を解明した。閉じ込めサイズが 5 μm とまだ少し大きい、ヘリウム薄膜上の電子を確実に長時間安定にトラップすることができ、5 μm チャンネル中では閉じ込めの効果が現れ、その性質も定性的に理解でき、単一電子の閉じ込めを実現出来るという手ごたえを得た。

量子ビットの観点以外に、この電子の閉じこめ系の興味深い物理的性質の研究を続けていく確かな橋頭堡を築いた。

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

H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono,
“Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel”,
Journal of Low Temperature Physics, vol. 150, p 224–229 (2008).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

池上弘樹、秋元彦太、河野公俊
タイトル 1次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子
日本物理学会 2007 年春季大会, 19pRD-9.

H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono
Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel
International Symposium on Quantum Fluids and Solids(QFS2007).

池上弘樹、秋元彦太、河野公俊
1 次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子 II

日本物理学会第 62 回年次大会, 22aXQ-2.

H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono

Wigner Solid Transition of Electrons in a Micrometer-wide Channel

International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials
(PSM2007) PA64.

池上弘樹、秋元彦太、河野公俊

1 次元チャンネルに閉じ込められたヘリウム液面電子 III

日本物理学会第 63 回年次大会, 26pWA-2 (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

超伝導クーパ対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発

2. 氏名

趙福來

3. 研究のねらい

2 個の相関している量子、EPR 対は光子で実現され、量子情報処理へ向けた応用研究が盛んに行われている。一方、真空中の電子 EPR 対はその強い相互作用を生かした量子実験が期待できるが、必要不可欠な高密度 EPR 対電子ビームは実現されていない。本研究では、ナノチップ、ニオブ超伝導体チップ等の様々なナノ電子源に関して蓄積した技術を基礎に、電子源中での電子相関をそのまま電子ビームに反映させた高密度の EPR 対電子ビームを開発する。

4. 研究成果

ナノ電子源から放出される電子ビームの電流ノイズの変化を測定した。ノイズ測定のため開発した極高真空低温電界電子放出顕微鏡の圧力は実験を行うシステムとしては記録的な 3×10^{-10} Pa であって、不純物による電流の揺らぎも極めて少なかった。装置に W(111) 針を搭載して極高真空下で行ったショットノイズ測定は 10 Hz 以下という低周波測定記録を達成した。そして装置の極高真空環境を利用して、仮に電界電子放出現象を応用した極高真空領域の圧力測定法を開発した。以下にその二つの成果と装置の構造について述べる。

A. 極高真空低温電界電子放出顕微鏡

極高真空低温電界電子放出顕微鏡の真空容器の内壁と全ての金属部品には電解複合鏡面研磨が施された。研磨後 1×10^{-4} Pa 程度の真空中で、真空容器と導入端子は 350°C、他の金属とセラミック部品は 450°C で 24 時間以上加熱するガス出しを行った。真空システムはターボ分子ポンプを除いた全て、オーブンをを用いて 170°C で 48 時間そのベーキングを行った。オーブンの中の温度のむらは $\pm 5^\circ\text{C}$ 以内であった。

イオンポンプは 10^{-9} Pa 台前半以下では殆ど排気しないので、TSP (チタンサプリメーションポンプ) だけで排気する方が、(イオンポンプ + TSP) で排気するより、到達圧力を下げられると考えられる。しかし実験装置ではフィラメントのアニール、部品のガス出し、実験用ガスの導入など、圧力が上がる場合が多い。実用的な面から見ると、ガス放出量が極めて少ない (イオンポンプ + TSP) が最適だという考えのもと、排気システムを構成した。ベーキング中と前の排気はターボ分子ポンプを用いて行われた。ベーキングの終了後、ターボポンプと真空容器をつなぐオールメタルゲートバルブを閉め、純クロム酸化膜作製法で処理された極高真空用のイオンポンプと TSP で排気した。ベーキングした後 24 時間で、到達圧力は $4 \sim 6 \times 10^{-10}$ Pa に達した。フィラメント、蛍光スクリーンと電界放出電子源のガス出しを行った後、圧力は少し上がり $7 \sim 8 \times 10^{-10}$ Pa になった。

B. 電界放出電流のショット雑音測定

10^{-9} Pa 台の超高真空下における電界放出電子源からの放出電流の揺らぎには、吸着分子によるフリッカー雑音 (Flicker Noise) とショット雑音 (Shot Noise) が含まれている。フリッカー雑音は電界放出電子源の表面でガス分子が吸着、表面拡散、脱離等の動的運動をすることで仕事関数 ϕ が変化して発生する。放出電流値 I_{FE} は以下の Fowler-Nordheim 式で表される。

$$I_{\text{FE}} \propto \frac{(\mu/\phi)^{1/2}}{(\phi + \mu)} \exp(-C \cdot \phi^{3/2}) \quad (1)$$

ここで C は電子源の大きさ (針先端の曲率) と電界の強度で決められる比例定数、 μ はフェルミレベルである。変動 ΔI は仕事関数の変化 $\Delta\phi$ が小さいとき $\Delta I \propto -\Delta\phi$ になり、仕事関数がゆらぐと電流

はそれに比例して揺らいでしまう。

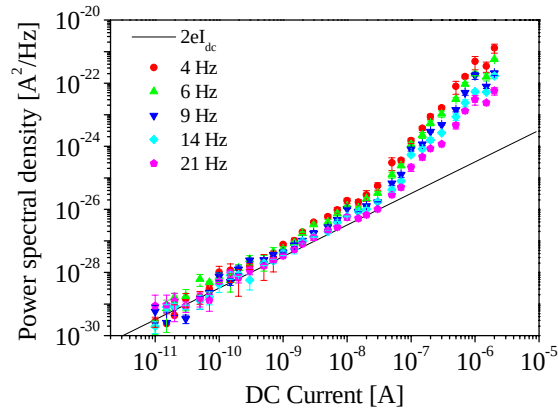


図1. 放出電流ノイズの電力スペクトル密度

吸着分子による電流変動の電力スペクトル密度(Power Spectrum Density: PSD)は電流量の二乗に比例し($N_f \propto I^2$)、周波数のべき乗には反比例($N_f \propto 1/f^\alpha$)することがよく知られている。一方ショット雑音は、その電力スペクトル密度が周波数全領域で一定($N_s = 2eI$, e は電子の電荷の絶対値)の白色雑音である。超高真空領域で電界放出電流の電力スペクトルを観察すると、1kHz以下の低周波領域ではフリッカー雑音に埋もれてショット雑音は観察できない。Kleintは徹底的な周辺の電極のガス出しのあと 10^{-9} Pa前半の真空下で 100Hz以下までショット雑音を測定したと報告し、それは今まで最も低い周波数で行ったショット雑音測定であった。

雑音の測定は(Agilent 4396B)を用いて行った。 7×10^{-9} Pa程度の極高真空中でW(111)電子源を洗浄した後 1kV程度の電圧を引き出し電極にかけ、10 pAから 100 μ Aまでの電界放出電流のスペクトル密度を得た。図1に数十Hz以下の低周波で測定したスペクトル密度を示す。4Hzでは 10 pAから 1nAまでスペクトル密度はショット雑音の理論(実線、 $N_f = 2eI$)とよく合ったが、1nA以上では理論直線(実線)を上まわる傾向を見せた。高い周波数になるとスペクトル密度の実測値がより広範囲で理論曲線に合い、20Hz程度では 10 pAから 50nAまでほぼ理論と一致した。100 nA以上におけるスペクトル密度は電流の二乗に比例し、周波数のべき乗には反比例するフリッカー雑音になった。この雑音は洗浄後表面に残っているガス分子、あるいは表面のタングステン原子の動きで発生すると考えられる。

電界放出電子源の表面でのガス分子の吸着量が増えるにつれて、雑音のスペクトル密度は増加し、雑音のスペクトルは平坦なショット雑音的から $1/f^\alpha$ タイプのフリッカー雑音的に変化した。2 日間電子源を 1×10^{-9} Paの真空で放置すると、吸着により雑音が増加して、 N_f が I^2 に比例するフリッカー雑音の典型的な電流依存性を示した。

C. 放出電流の減少速度を利用した圧力測定

超高真空の圧力は一般的にイオンゲージで測定される。イオンゲージはフィラメントから熱放出される数mAの電子を残留ガスに衝突させ、イオン化されたガスのイオン電流を測定して圧力を読む。イオンゲージでは熱電子が電極に衝突する時に出るX線やESDイオンが雑音を起こす。 10^{-10} Pa台の極高真空になると、イオン電流が数百fAレベルに下がり、X線やESDイオンによる雑音に埋められ、圧力測定が極めて難しくなる。発生するX線やESDイオンを防ぐため巧妙な機構が開発されたが、構造が複雑であり普及していない。 10^{-10} Pa台の極高真空領域の圧力を測定するには、根本的に違う原理で働く圧力ゲージが必要だとも言える。

吸着量が少なく、仕事関数の増加量 $\Delta\phi$ が元の仕事関数 ϕ_0 に比べて小さいとき式(1)は、下式に

$$\log I_{FE} \approx -\frac{3}{2} C \phi_0^{1/2} \Delta\phi + \log I_0 \quad (2)$$

近似できる。

ここで I_0 は初期の電流値である。N個の分子が電子源に吸着したとき、分子の電気双極子モーメントをDとすると、仕事関数の変化量 $\Delta\phi=2\pi ND$ である。吸着分子の数Nは圧力Pと時間tに比例する。放出電流の対数を縦軸に、時間を横軸に取った片対数グラフは理論的には直線になり、その傾きは圧力Pに比例して一定になる。しかし放出電流片対数グラフが長時間直線になったという報告はまだ無かった。

我々は電子源周辺の電子線衝突によるガス出しを行った後、周辺の部品を液体窒素温度に冷却し、放出電流片対数グラフが長時間直線になることを見出すのに成功した。電子源を洗浄した直後、放出電流を2nAに調整して引き出し電圧を一定に維持し、放出電流の減少の様子を観察した。

$7\times 10^{-10} \sim 3\times 10^{-9}$ Paの圧力下で測った放出電流の片対数グラフは、200pAの上ではほぼ直線であり、ほぼ完璧に(相関係数 $R^2>0.999$)フィッティングされ、その傾きは圧力に比例する傾向を見せた。作製した極高真空電界放出システムで電流の揺らぎが極めて小さい($\Delta I/I < 0.01\%$)特性を生かして、短時間の片対数グラフの傾きから圧力を測定することも可能であった。2.5 分間 0.5 秒毎に取った300個の放出電流データの片対数傾きを換算して得た圧力値(P_F)は、イオンゲージの測定値が平均値 $P_1=7.5\times 10^{-10}$ Paを中心に $\pm 10\%$ 以上変動する真空の中で、10 時間測定した P_F の値は平均 5×10^{-10} Pa、標準偏差 10%以下の分布を見せた。データの個数を 100 個(50 秒間)、50 個(25 秒間)に減らすと標準偏差はそれぞれ 13%、21%に増えた。

5. 自己評価

本研究の目標は1)ナノ電子原から放出される相関性の強い電子線の確認と2)超伝導電子源からクーパー対を放出させて高密度の EPR 対電子線を作製することである。3 年の研究期間で研究目標 1)は部分的に果たし、その結果を数本の論文にまとめた。目標 2)は装置(極低温電子銃)の開発が遅れ、研究期間内に EPR 対を確認することは出来なかった。極低温電子銃の作製は電子顕微鏡の次世代電子銃開発につながる見込みで、産業への応用を考えると十分意義があったと考えられる。

6. 研究総括の見解

極高真空低温電界電子放出顕微鏡の圧力として世界記録 3×10^{-10} Paを達成し、装置W(111)針を搭載して極高真空下で行ったショットノイズ測定は 10Hz以下であるという低周波測定記録を達成した。さらに装置の極高真空環境を利用して電界電子放出現象を応用した極高真空領域の圧力測定法を開発した。

目的の超伝導クーパー対には達しなかったが、そのための基礎技術について上記の大きな成果を上げた。他の実験の基礎技術としても有用であろう。総括としては、もう2年研究を続行させたかった。

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

B.Cho, T. Ishikawa and C.Oshima, "Coherent and intense multibeam generation by the apex of sharp nano objects: Electron half-circular prism", Applied Physics Letters **91**(16), 163102 (2007) [Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology **V16**, Issue 18.]

B.Cho, T. Itagaki, T. Ishikawa, and C.Oshima, "Measurement of pressure in 10^{-10} Pa range from the damping speed of field emission current" Applied Physics Letters **91**(1), 012105(2007).

B.Cho, T. Itagaki and C.Oshima, "Record of the lowest frequency shot noise measurement below 10 Hz" Applied Physics Letters **91**(5), 051916 (2007).

②特許出願

研究期間累積件数:1件

発 明 者:趙福来

発明の名称: 電子線源装置

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 2006-324558)

③受賞
なし

④著書
なし

⑤学会発表

板垣考洋、趙福来、石川剛、六田英治、大島忠平 “タイトル 10Hz 以下における極高真空電界放出電子ショットノイズ測定 ”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会(2007 年春季), 29p-ZV-7.

裏田友洋、趙福来、石川剛、六田英治、野々垣良三、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 “単原子電子源の走査型電子顕微鏡への応用”, 第 47 回真空に関する連合講演会(2006), 7P-44.

趙福来、板垣考洋、裏田友洋、石川剛、六田英治、大島忠平 “極高真空電界電子顕微鏡の作製とテスト”, 第 47 回真空に関する連合講演会(2006), 9Ba-1.

⑥招待講演

B.Cho, T. Ishikawa, and C. Oshima, “Fluctuations of field emission currents under extreme high vacuum”, 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '07.

趙福来 “極高真空電界電子放出と韓国の極高真空技術 ”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会(2007 年春季), 27p-ZX-5.

趙福来、板垣考洋、石川剛、六田英治、大島忠平 “極高真空下でのタングステン<111>電界放出電子源の電流揺らぎ”, 第4回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム(2007).

【B その他の主な成果】

①論文

B.Cho, T. Itagaki, T. Ishikawa, E. Rokuta, and C.Oshima, “An XHV-FEM for study on the inherent fluctuation of field emission” Journal of Vacuum Science and Technology B **25**, 1420 (2007).

Tsuyoshi Ishikawa, Tomohiro Urata, Boklae Cho, Eiji Rokuta, Chuhei Oshima, Yoshinori Terui, Hidekazu Saito, Akira Yonezawa, and Tien T. Tsong, “Highly efficient electron gun with a single-atom electron source”, Applied Physics Letters **90**, 143120 (2007).[Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology **V15**, Issue **16**.]

②特許出願
なし

③受賞
なし

④著書
なし

⑤学会発表

裏田友洋、石川剛、趙福来、六田英治、野々垣良三、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 “単原子電子源の走査型電子顕微鏡への応用(II)”, 第 67 回応用物理学会学術講演会(2006 年秋季), 31p-ZM12.

裏田友洋、趙福来、石川剛、米澤彬、齋藤秀一、大島忠平 “実用的極高真空システムの開発

と応用”，第 53 回応用物理学関係連合講演会(2006 年春季), 23a-T10.

⑥招待講演
なし

研究課題別評価書

1. 研究課題名

光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究

2. 氏名

長谷川祐司

3. 研究のねらい

思考実験は量子物理学の核心を示すもので、その多くはレーザーをはじめとした光学実験として実現されてきた。歴史的に、量子システムとしては電子、原子などが広範に使われてきた。その一方、1930年代のチャドウィックによる発見以来、中性子は物性物理学の、あるいは、核物理学の研究の有用な手段として頻繁に使われてきた。量子操作の点からすると、中性子は検出器をはじめ操作の高効率性が特に有用である。1970年代の結晶学的なそして測定器の発展によって、中性子の物質波を用いた広範な干渉実験に耐える干渉計が開発された。この中性子干渉計を用いて、 $1/2$ スピンの 4π 対称性、重力ポテンシャルによる位相シフト、アップ・ダウンのスピンの重ね合わせなどの多くの思考実験がはじめて行われた。

近年の量子情報技術の発展に際し、本研究は、技術の基礎基盤である量子力学的物理現象の研究を目指している。特に干渉計とスピン干渉計であるポラリメータを用いた量子干渉効果の研究に重点をおいている。多くの実験はヨーロッパの Atominstytut (ウィーン)、ラウエ・ランジュバン研究所 (フランス) で行った。さらに次世代中性子源に照準を合わせた将来計画の推進のために日本原子力研究機構でも実験を行った。最後に、中性子を用いた量子光学の研究が日本でも根付くのに本研究が役立てば本望である。

4. 研究成果

1. 中性子干渉計実験

1.1. 2キュービット

ここでは、ベルの不等式の破れに使ったパスとスピンの自由度を2キュービットとした実験に関する成果を記述する。

1.1.1. Kochen-Specker 的な実験

量子力学と古典力学の違いが、ベルの不等式が示す統計的な破れとしてではなく、no-go theorem である Kochen-Specker の定理として知られているような論理的な矛盾として示される特殊な場合があることが (論理的に) 知られている。本研究ではそのような Kochen-Specker の定理に関する実験を行った。実験配置を図1に示す。

実験の解析としては、実際の量子操作の効率は 100%とはならないので矛盾を示すと同時に2つの不等式を導出して実験結果を吟味した。

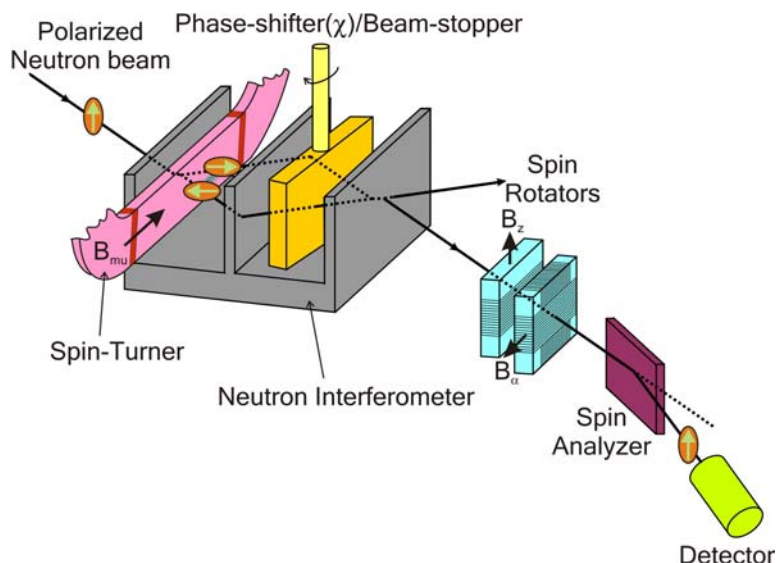


図1 Kochen-Specker の定理に関する実験の配置

実験結果は、実際の干渉計のコントラストが 70%弱だったことを反映して、(1)約 63%の Kochen-Specker 的な矛盾、ならびに、(2)統計的な確率を考慮した不等式の破れ、(3)product observables を用いた不等式の破れが観測された。この実験に触発されて、スペインの理論家 A. Cabello との共同研究が始まり、中性子を用いてさらに高率な Kochen-Specker 的現象の考察を行い、理論の論文を投稿し、実験の準備を進めている。

1.1.2. 量子トモグラフィ

ベルの不等式、Kochen-Specker の定理の実験の後、エンタングルした2キュービットの完全な特徴づけのために、様々な系で行われてきた、密度行列で表された系のトモグラフィックな測定を行った。それぞれ4点に相当するパスとスピンのオブザーバブルの16個のジョイント測定をしている。

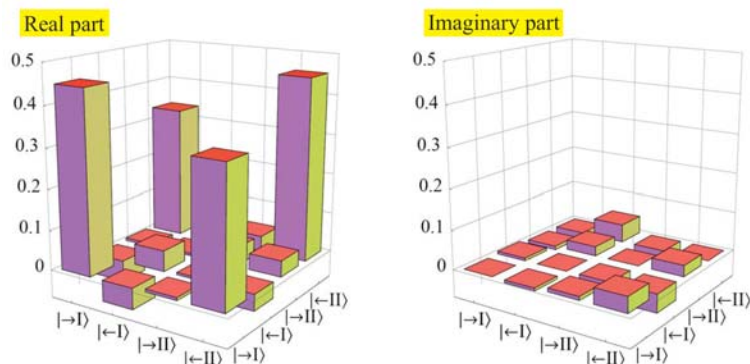


図2 量子トモグラフィの結果

ベル状態のひとつに関する結果をヒストグラムに表したものを図2に示す。さらに Fidelity (生成した状態と望んだ状態のオーバーラップ) は 0.79、そして Concurrence (エンタングルメントの指標である) は 0.59 であると確定した。また、我々の実験配置の利点であり具体的には干渉計を微小角回転させて容易に生成できる、他のベル状態に関してもトモグラフィ測定を行った。その状態の Fidelity と Concurrence は 0.75 と 0.52 であった。先の状態に比べての若干の減少は入射ビームに含まれる高調波の影響だと考えられる。

1.2. 3キュービット

ここでは先のパスとスピンの2キュービットに、エネルギー自由度を加えて3キュービットとした実験の成果を記述する。

1.2.1. エネルギー固有状態の操作

2キュービットの実験を高度化するためにはさらなるキュービットを加える必要がある。中性子において、時間依存した磁場との相互作用でコヒーレントなエネルギーの操作が可能なが知られている(図3参照)。本研究ではこの操作を利用してエネルギー自由度を第三のキュービットとして加え、3キュービットの実験の可能性を探った。

そのためには、まず、干渉計内で一方のビームのエネルギー操作を行い、その後、2つのビームのエネルギー差を補償する方法を考えた。実験配置を図4に示す。

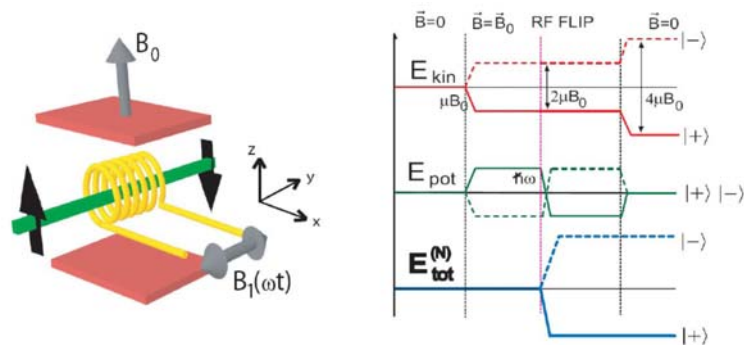


図3 エネルギーのコヒーレントな操作

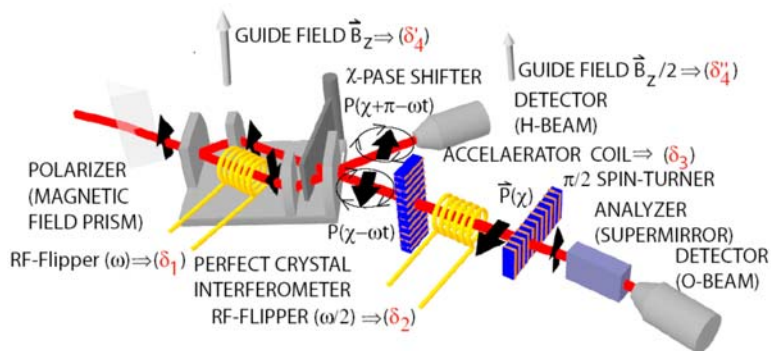


図4 エネルギーの操作を含む干渉実験

ここで注意すべきは、まず2つのラジオ波(RF)スピントリッパーの周波数が ω と $\omega/2$ であることである。そのため、干渉計周辺には第二のヘルムホルツコイルで追加のガイド磁場を印加している。また、中性子干渉計は温度差に敏感なので、スピントリッパーやヘルムホルツコイルはすべて水冷機構がなされている。

実験結果を図5に示す。H波(反射側の干渉波)はエネルギー差が補償されず時間依存したスピンの回転が起こっていると思われ、定常的な干渉パターンは観測できない。一方、O波(透過方向の干渉波)はエネルギー差が補償され、干渉計のもともとのコントラストと同等の、干渉パターンが観測された。

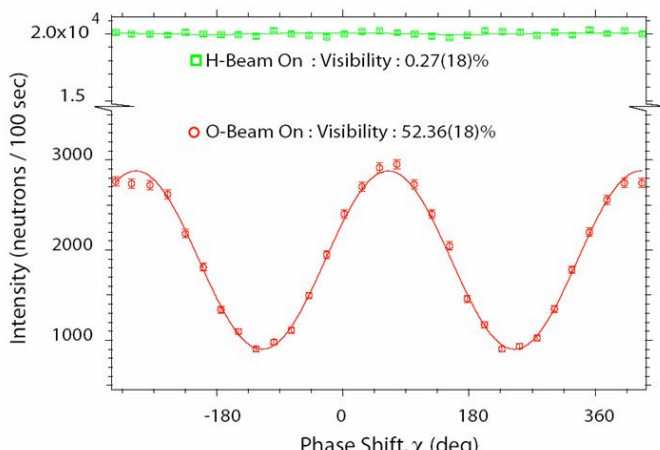


図5 エネルギー差を補償した干渉パターン

この実験により、さらなるキュービットである中性子のエネルギー準位のコヒーレントな操作が確立し、3キュービットの実験にむけて大いに進歩した。さらに、2つのRFスピントリッパーを用いた操作は幾何学的位相の生成も含み今後の応用が期待されている。

1.2.2. GHZ状態

まずはエンタングルした3キュービットの実験の手始めとして、光子や原子を使って行われてきたGHZ状態の実験を行った。実験配置を図6に示す。3つのキュービットの位相はそれぞれ、位相板(χ)、磁場によるスピン回転(α)、ゼロ場歳差(γ)によつ調整する。量子力学と古典力学の予測の違いはマージンが定義した、

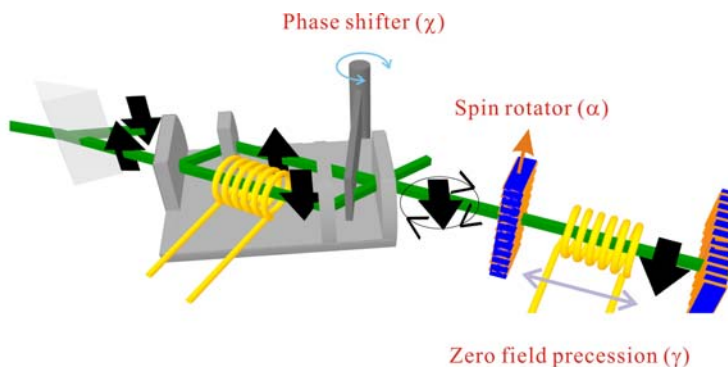


図6 GHZ状態の干渉実験

$M \equiv E[\sigma_x^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_x^e] - E[\sigma_x^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_x^e]$ を用いると、古典的にはこの M の絶対値は2以下であるのに対して、量子力学では $M=4$ になることが示されている。我々の実験ではこの M が2.62となり、ここでも古典的な予測の破れが見られた。

1.3. 日本原子力研究機構での実験

以前、研究者はJAEAでビームラインを建設し干渉実験を行った。今回は再び干渉実験を試みた。まず2005年度は既存の干渉計を用いて干渉実験を行った(図7参照)。この干渉計は不均一さがあり、干渉パターンを得るには入射ビームの波長を短くし、ビームを絞る必要があり、そのためコントラストは40%に達したが、

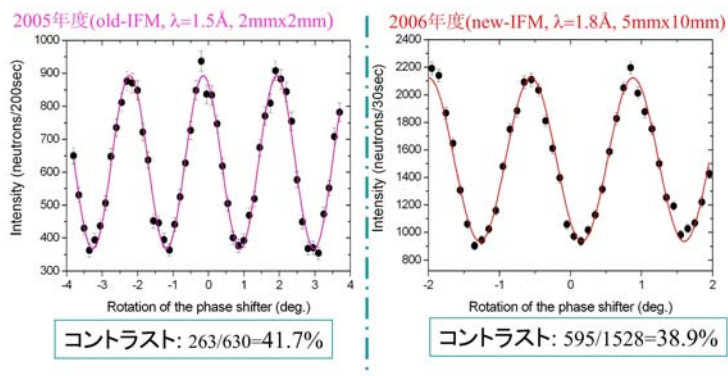


図7 PNOでの干渉実験の結果

収量は少なかった。一方、2006 年度には新規の干渉計を作成し長めの波長を用いて実験を行った。この干渉計は、だいたい均一にできており、ビームサイズを大きくすることにより、コントラストはあまり改善されなかったが収量はすこぶる増加した。上記の実験はPNOビームラインで行ったが、このビームラインはビームタイムの調整に難があった。さらに、炉室のPNOよりもガイドビームラインであるULSのほうが干渉計実験に適した波長の収量の点で得するとの解析があり、最終年度にはULSビームラインでの実験の準備を行った。

2. 中性子ポラリメータ実験

2.1. 幾何学的位相

研究者は、長年、幾何学的位相(ベリー位相)に関して様々な実験を行ってきた。本研究では、特に混合状態における幾何学的位相および幾何学的位相の robustness に関しての実験を行った。図8に前者の実験配置を示す。ここでは、入射スピンをノイズを加えた $\pi/2$ スピン回転器でアップとダウンの重ね合わせの混合状態を生成しSU(2)での発展後の位相を測定した。

実験は、当初、均一な混合状態を生成するのに苦労したが、最終的には純幾何学的、純動力学的、そして両者の混合の位相を測定できた。その結果の一部を図9に示す。理論的に予想されたように、混合比 r に比例しない位相がそれぞれ観測された。さらに、一般的な混合状態に関して全位相は純幾何学的位相と純動力学的位相の和で与えられないことを実験的に確認した。これは今までどこにも発表されておらず、今回の研究における重要な知見であると思われる。

さらに幾何学的位相に関しては、量子計算の応用が期待されている、ノイズなど外的な摂動に対する robustness に関する実験を行った。具体的には、数分間以上にわたって溜めた超冷中性子を用いてポラリメータ配置で実験を行った。実験結果から、操作時間を長くするにつれて位相の分散が小さくなることが観測された。

2.2. 高精度な操作下の2キュービット

上記のGHZ状態の実験を行うにあたって、「ゼロ場歳差運動」に関する確証実験をする必要を感じた。そのため、急遽、ポラリメータを用いた実験を行った。実験配置を図10に示す。入射ビームのスピンを $\pi/2$ スピン回転器でアップとダウンの重ね合わせの状態にし、2つ目のRFスピンフリップの位置をずらして発展時間を調整して $\omega_L t$ 位相を観測した。ここで重要なのはRFフリップと同時にDCフリップを挿入してラーマー歳差運動をキャンセルしている点である。

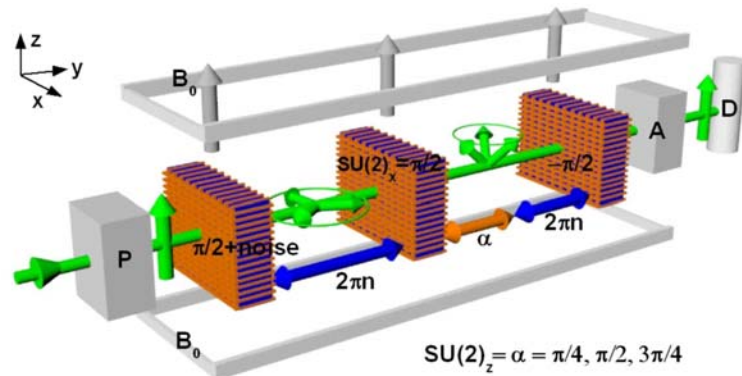


図8 混合状態の幾何学的位相の実験配置

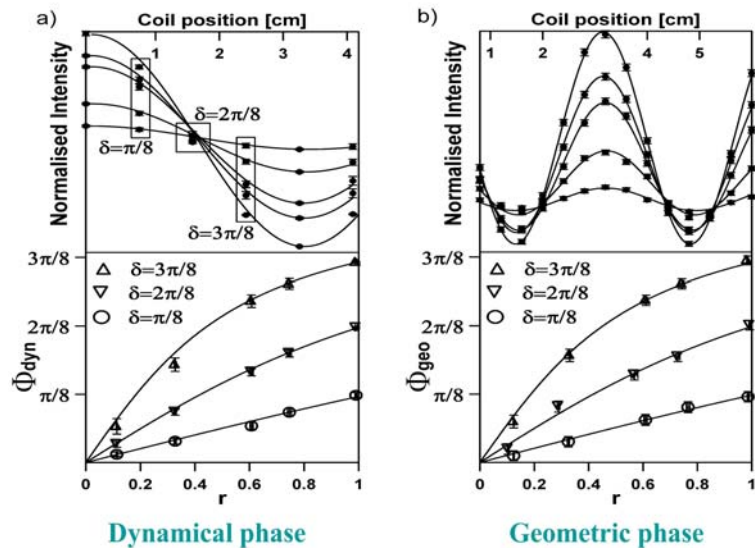


図9 混合状態の幾何学的位相

実験結果を図11に示す。ここでは、予想されたように、周期の ω_r の依存性が明確に見られる。さらに、ガイド磁場をスキャンした測定も行ったが、そこでは周期がガイド磁場に依存しないことが確認された。

このようなスピンとエネルギーの自由度を用いた2キュービットの実験に関して、現在、ベルの不等式の実験を行っている。そこではパスとスピンを用いた実験に比べて、各光学素子の効率が99%を超えることなどを利用した高度な操作下でのより高度な量子力学のテストとしてさらなる発展が期待されている。

2.3. Wigner 関数の測定

上記の実験以外にも、イタリアとチェコの理論家と共同で中性子のスピン操作の応用した、ウィグナー関数の測定の実験に関して理論的な考察を行った。本研究で数十 MHz を超える高周波を用いたスピンフリップパーの開発に関した予備実験を行った。その結果、提案された実験は十分実現可能であり、早急な実現が期待されている。

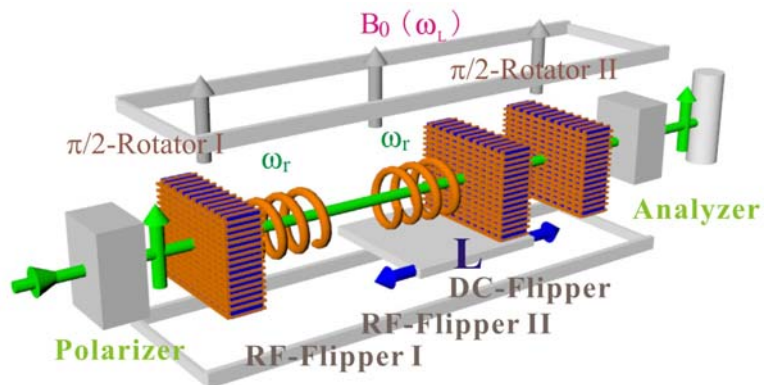


図10 ゼロ場歳差運動の実験配置

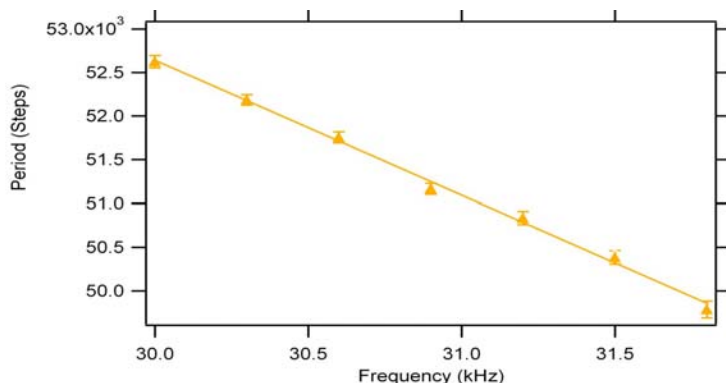


図11 ゼロ場歳差運動の実験結果

5. 自己評価

干渉実験に関しては、大きく分けて2キュービットとさらに発展させた3キュービットの実験を行った。まず、パスとスピンを用いた2キュービットの実験に関しては Kochen-Specker 的な実験を手始めに、量子トモグラフィまで完成した。その過程で、理論家との共同研究が生まれ、さらなる実験の可能性を議論し、新たな実験の種が見つかった。現在、実験の実現に向けて準備を進めている。さらに、プロジェクト開始当初は予期していなかった、エネルギーを加えた3キュービットの実験も紆余曲折の後に行うことができた。現在のところ、コヒーレントなエネルギーの操作と GHZ 状態に関する実験を終了した。このテーマの実験はまだ始まったばかりで、これから大いなる発展が期待できると思われる。特に、最近、k 空間を第四の自由度として加味できることに気づき、早々に実験を進めていく予定である。また、JAEAでの実験では、新たな研究パートナーとの共同研究が始まり j-parc での次世代パルス中性子源を使った研究に役立つと思われる。

一方、ポラリメータ実験に関しては、研究者が長年研究をしてきた幾何学的位相(ベリー位相)のいくつかの実験を終えた。混合状態の幾何学的位相の実験は一例であり、この実験をさらに発展させて、非ユニタリー発展する系の位相、k 空間とスピン空間それぞれの幾何学的位相などの実験をこれから取り掛かりたいと思っている。また、ゼロ場歳差運動をはじめとする、スピンとエネルギーエンタングルメントは、高効率な操作が可能であり、マルチエンタングルメントを含め、これからの発展が期待される。これらと平行して、Wigner 関数の測定に関する実験の理論的な取り扱いを終え、実験の実現に向けて取り組みを開始した。これらの研究は、現在の実験可能な領域を広げるとともに、より一般的な新たな実験の可能性を示し、あるいは理論的な取り扱いを終え、い

くつかのテーマは実験を待つのみである。

最後に、本研究では、オーストリアではウィーン工科大学の大学院生を、プロジェクト後半では日本で京都大学の学生の参加を積極的に促し、人材育成に努めた。このため、多くの研究テーマを同時進行で行うことになった。大学院生の活躍によって研究自体は大きく進展した反面、その研究成果を論文にまとめることに手間取り、本研究で得られた多くの研究成果の論文発表に手間取っている。今後、早急に研究成果を論文として発表する予定である。

6. 研究総括の見解

おそらく世界でも数少ない中性子干渉計を用いた量子力学の基本原理に関する数々の実験を行い多くの成果を上げた。その大部分は中性子の経路とスピンをそれぞれキュービットとして扱うが、最近ではさらにエネルギーの自由度もとり入れて3キュービットとしている。Kochen-Speckerの定理の破れ、GHZ状態の実験、幾何学的位相(ベリー位相)、量子トモグラフィーなど多岐にわたっている。

中性子という特徴のある系について、量子力学の基本的研究の有用性はこれからもあると思われる。この領域の研究で国際的評価と国内的評価のギャップの最も甚だしいもので、総括として継続的なアピールの必要性を感じる。

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

- Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, and H. Rauch, Quantum contextuality in a single-neutron optical experiment, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 230401.
Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, and H. Rauch, Quantum contextuality in neutron interferometer experiments, *Physica B* **385-386**, part 2 (2006) 1377-1380.
Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, S. Filipp, J. Klepp and H. Rauch, Evidence of entanglement and full tomographic analysis of Bell states in single-neutron system, *Phys. Rev. A.* **76** (2007) 052108.

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

- Y. Hasegawa, R. Loidl, S. Filipp, J. Klepp and H. Rauch, Quantum state tomography of neutrons, 55.Jahrestagung der ÖPG(The Austrian Physical Society) (2005).
R. Loidl, J. Klepp, S. Sponar, S. Filipp, G. Badurek, H. Rauch, Y. Hasegawa, Violation of Mermin's inequality for GHZ state neutron interferometry, 57.Jahrestagung der ÖPG(The Austrian Physical Society)(2007).
Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Neutron Interferometer Experiments, International conference on neutron scattering (ICNS2005), Sydney Convention & Exhibition Centre, Sydney, Australia, 27.Nov.-2.Dec. 2005.
Y. Hasegawa, Exploring quantum states with neutrons, 13th Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO), Scientific Center of the Polish Academy of Sciences, Vienna, Austria, May 23-27, 2006.
Y. Hasegawa, Spin-Path Entanglement in Neutron Interferometer Experiments, Theoretical and Experimental Foundations of Recent Quantum Technologies, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, July 10-14, 2006.

⑥招待講演

Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Single-Neutron Optical Experiments, Quantum Theory: reconsideration of foundations-3, Vaexjoe University, Vaexjoe, Sweden, 6-11 June 2005.

Y. Hasegawa, Neutron optical experiments exploring fundamental quantum phenomena, Workshop 'Classical and Quantum Interference', Palacky University, Olomouc, Czech Republic, 20. October, 2005.

【B その他の主な成果】

①論文

R.A. Bertlmann, K. Durstberger, and Y. Hasegawa, Decoherence modes of entangled qubits within neutron interferometry, quant-ph/0512103, Phys. Rev. A. **73** (2006) 022111.

G. Badurek, P. Facchi, Y. Hasegawa, S. Pascazio, H. Rauch, J. Rehacek, T. Yoneda, Neutron wave packet tomography, quant-ph/0503215, Phys. Rev. A. **73** (2006) 032110.

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

Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Single-Neutron Interferometer Experiments: Violation of a Bell-like Inequality, Congress of Philosophy and Foundations of Science-IXb, CPFS-XIb, India International Center, New Delhi, India, 10-14 January 2005.

研究課題別評価書

1. 研究課題名

代数的量子情報処理技術の研究

2. 氏名

濱田 充

3. 研究のねらい

量子計算においてデコヒーレンス等の量子雑音に抗する技術として、また量子暗号の中心的情報処理機構として、高性能な代数的量子誤り訂正符号が求められている。本研究では、符号の持つシンプレクティック幾何の構造に注目し、これまでに理論的・定量的に存在を証明してきた高性能な符号をベースに、様々の場面に利用可能な量子符号や同様の構造を持つ量子情報処理方式(量子エンタングルメント蒸留など)を実際に設計することを目指してきた(図1)。特に、代数的量子誤り訂正符号に重点を置いたが、これはシンプレクティック符号(ステイビライザ符号)のことを指す。シンプレクティック符号は古典の線形符号(線形誤り訂正符号、あるいは単に符号)に類似した構造を有する。より具体的に、研究提案時に掲げた研究目的は以下の通りである。

- 1) 量子計算機の実現に向けた新しい量子誤り訂正符号の提案、設計、開発、性能解析。
- 2) 量子暗号システムの実現に向けたより優れた Calderbank-Shor-Steane (CSS) 符号の提案、設計、開発、性能解析。
- 3) エンタングルメント蒸留など関連する代数的量子情報処理方式の提案、設計、開発、性能解析。
- 4) これらの技術の統一的な視点からの理論的整備、および更なる応用の探索。
- 5) 通信路容量のような代数的量子情報処理方式に関連する理論的問題の探求。

4. 研究成果

目的の 1), 2), 3) は具体的なもので、一括りに代数的量子誤り訂正符号の設計ということが出来る。これについては、「研究のねらい」で述べた古典符号とシンプレクティック符号の類似性を利用し、古典で知られている符号設計の方法論に根ざした方法でシンプレクティック符号の設計を行った。

また、次の2つを区別して研究を進めることが必要と考えた。

i) 一般のシンプレクティック符号、

ii) CSS符号。

i) は ii) のクラスを含むのであるが、このように分けるのは、現状の技術で ii) が量子暗号に用いることができるという事情からである。なお、原理的には i) も暗号として使え

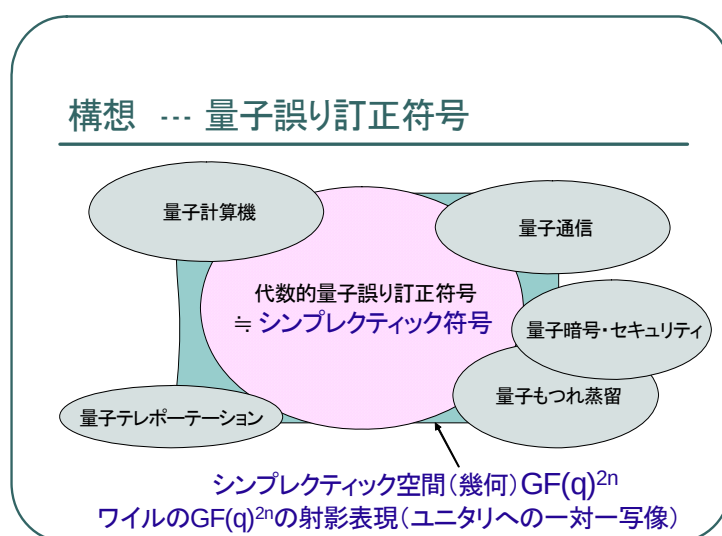


図1 研究構想

るが、その実現には多粒子間のエンタングルメントを自由に操る高速の量子計算機が暗号プロトコルの参加者に必要となる。

また、符号の評価基準としては

(c1) 情報理論的基準: 復号誤り確率

(c2) 符号理論的基準: 符号の最小距離

が知られている。本研究では、(c1) が重要だが (c2) も扱う。これは、主に、本研究の文脈では (c1) が正統な基準なのだが、比較すべき従来結果の殆どが (c2) を用いているという事情からである。

このような方針に基づき研究を進め以下の主要成果を得た。

(1)代数的量子誤り訂正符号の一般的構成法。(2)前項の一般的構成法を用いた(c1)の意味で高性能な代数的量子誤り訂正符号の明示的構成。(3) 前々項の一般的構成法を用いた(c2)の意味で高性能な代数的量子誤り訂正符号の明示的構成。(4) 構成した符号を含む代数的量子誤り訂正符号の情報セキュリティへの応用と解析。

目的 1),2),3)に関して、中核となる結果(1),(2),(3)を得た。4),5)に関する主な結果は上記では(4)であるがその他に進行中のものもある。以下、物理的背景および予備知識の整理の後これらの成果を順に説明する。

(0a) 物理的背景

本研究の大方は有限体とその上のベクトル空間を土俵として行われており、物理は然程必要としないが、物理との直接的な繋がりがあることを理解いただくため「研究のねらい」でも述べた本研究の根底にある最も本質的な概念を以下に説明する。

シンプレクティック符号は古典の線形符号に類似していると書いたが、勿論シンプレクティック符号をシンプレクティック符号ならしめる本質差異もある。すなわち「シンプレクティックな内積」(正確には内積ではなく双線形形式)である。この根底にある概念は実は、量子力学において極めて基本的なもので、ある互いに共役な関係にある量の間に成り立つ交換関係である。これは、大まかには、Weyl 型の正準交換関係の離散版ともいえる。より具体的には、情報処理を担う素子が q 準位系であるとして、整数 $0, 1, \dots, q-1$ からなる集合 Z_q に q を法とする演算を考える。本報告では q は素数と仮定する。特に、このとき Z_q は有限体 $GF(q)$ となる。 $GF(q)$ の元を n 個ならべてできる n 次元ベクトル x と z を組にして $2n$ 次元ベクトル (x, z) を考える。そして Weyl によるこのベクトル空間の射影ユニタリ表現 $N(x, z)$ を考えると、その交換関係がシンプレクティックな内積で記述されるのである。すなわち、交換関係は $N(x, z)N(x', z') = \exp(i2\pi f(x, z, x', z')/q)N(x', z')N(x, z)$ で f が「内積」である。これが意味する最も重要な事実 $N(x, z)$ と $N(x', z')$ が交換する必要十分条件は $f(x, z, x', z')=0$ であるということである。なお $q=2$ のとき $N(x, z)$ は n 個のパウリ行列または単位行列のテンソル積の形で書ける。シンプレクティック符号とは互いに交換するいくつかの $N(x, z)$ の同時固有空間のことであり(勿論復号操作は別に与える)、交換する $N(x, z)$ たちを取るというのは、 N に通す前の (x, z) で言い直せば、互いに「内積」 f に関して直交している $2n$ 次元ベクトルたちを取るということに他ならない。

このように、シンプレクティック符号の根底にあるのは $GF(q)$ 上のベクトル空間であるため、シン

プレクティック符号の設計方針は古典の $GF(q)$ 上の線形符号にある程度類似することになる。しかし、古典の符号の設計では f に関する直交性の制約を課す必然性は無かったので、この制約のもと新たに符号を設計しなければならない。勿論、そのような方向の努力は既になされていたが、古典の符号理論(誤り訂正符号の理論)が Shannon の情報理論の誕生以降、一研究分野として確立し、半世紀を経た今もその発展が止まぬ状況と比べると量子情報理論における代数的符号の研究はその必要性に関わらず、必ずしも十分に発展しているとは思われない。換言すれば、研究の余地が大きい。本研究の主な内容は、この代数的構造を利用した情報処理技術の設計である。

(0b) 予備知識

有限体とは有限の元からなる体(四則演算が可能な代数系)のことである。元の個数が q 個の有限体を $GF(q)$ で表す。多くの応用では $q=2$ の場合を扱う。この場合、 $GF(q)=\{0,1\}$ である。本節でも説明を簡単にするため暫く $q=2$ とする。誤り訂正符号とは、情報の伝達(あるいは保存)の際に、 k ビットの情報の列(送るところの情報で、 $0,1$ の列)をより長い n ビットの列($n>k$)に符号化することで訂正の能力を実現する技術である。換言すれば、誤り訂正符号は情報に冗長を付加することで訂正を可能にしている。符号化した後の系列は $GF(q)$ の元を n 個並べて出来るベクトル空間 $GF(q)^n$ の部分集合とみなせるが、この部分集合が線形空間となると、これを線形符号と呼ぶ。この際、「符号」はもはや符号化というプロセスではなく集合を指している。これは符号の設計論といえる符号理論の習慣であるが、空間 $GF(q)^n$ 内でうまく点(系列)を配置することを問題にしているためと理解できる。

なお、 n を符号の長さ(符号長)と呼ぶ。また、前述評価基準(c2)の最小距離とはこれらの配置した複数の点のうちもっとも近い 2 点間の距離を指し、これが大きいことが望ましい。

(1) 代数的量子誤り訂正符号の一般的構成 [3]

CSS 符号とは本質的に $C_2^\perp \subseteq C_1$ という制約を満たす線形符号の対 (C_1, C_2) のことである。このような符号対を共役符号対と名づけた。ここで $C^\perp$ は符号 C の双対符号で、 C の全ての元に直交するベクトルからなる。有限体 $GF(q)$ 上の比較的小さい共役符号対(内符号と呼ぶ)とその拡大体 $GF(q^m)$ 上の符号対(外符号)が与えられたとき、それらを「接続(concatenate)」しより大きな共役符号対を得る方法を発見した。接続するもとの符号はボルトとナットのサイズの一致の様な不可避なパラメータの制約を除き、無制約である。これは従来から知られ広く実用にも供されている接続符号の概念[1]を共役符号対(CSS 符号)に拡張したものとみなせるが、それは非自明な拡張である。なぜなら、 (C_1, C_2) と (D_1, D_2) を接続するには、 C_1 と D_1 そして C_2 と D_2 を接続するのだが、接続して出来る符号対 (L_1, L_2) も $L_2^\perp \subseteq L_1$ という(物理に起因する)制約を満たさなければならないからである。なお、 (C_1, C_2) を符号の集団 $(C_1^{(i)}, C_2^{(i)})$, $i=1, \dots, N$ で置き換えてもこの構成法は有効である。

(2) 代数的量子誤り訂正符号の具体的構成法と情報理論的基準(c1)を用いた評価 [4]

まず背景について述べる。古典の符号を扱う上で重要な指針であり続けてきたのは、Shannon の通信路容量なる概念あるいは通信路符号化定理であろう。これは、1948 年に彼が発表した論文「通信の数学的理論」の中心に位置付けされるが、この理論は今日情報理論と呼ばれるものの原型である。この通信路符号化定理は良い符号の存在を保証するものであったが、具体的な符号の構成法を与えるものではなかった。また、定理を証明するに当たって用いられた符号は、符号化・復号化の複雑さを度外視した非実用的なものであった。その後何十年にもわたる情報通信の発展を見透かしたようなこの画期的な論文の発表以来、Shannon の意味での良い符号を構成する努力が連綿と続けられている。理論的なレベルでは、里程碑といえるこの問題への有意な結果が 80 年代に得られている。すなわち、Shannon の通信路容量を達成する代数的符号が Delsarte と Piret [2]によって得られた。

本研究に戻る。(1)において接続符号の手法を共役符号対の構成に持ち込むことに成功したので、[2]の構成法のアイデアが使えることは直ぐに予想できた。ただし、内符号の集団は比較的

小さなものが必要なためこれを新たに設計した。すなわち、内符号の集団を明示的に与えることで明示的な(多項式時間で構成可能な)連接共役符号対を得ることが出来た。本提案の符号が達成するレイトは知られている共役符号対(CSS 符号)で達成可能なレイトの中で最大である。本研究以前には、その最大レイトを達成する CSS 符号の存在が知られているのみであった。また、構成した符号は復号も多項式時間で行える。(c1)を扱った従来結果は、復号問題に限っても査読者の言葉を借りれば「試み」があった程度であるが、本研究では更に符号構成の問題にも解を与えた。

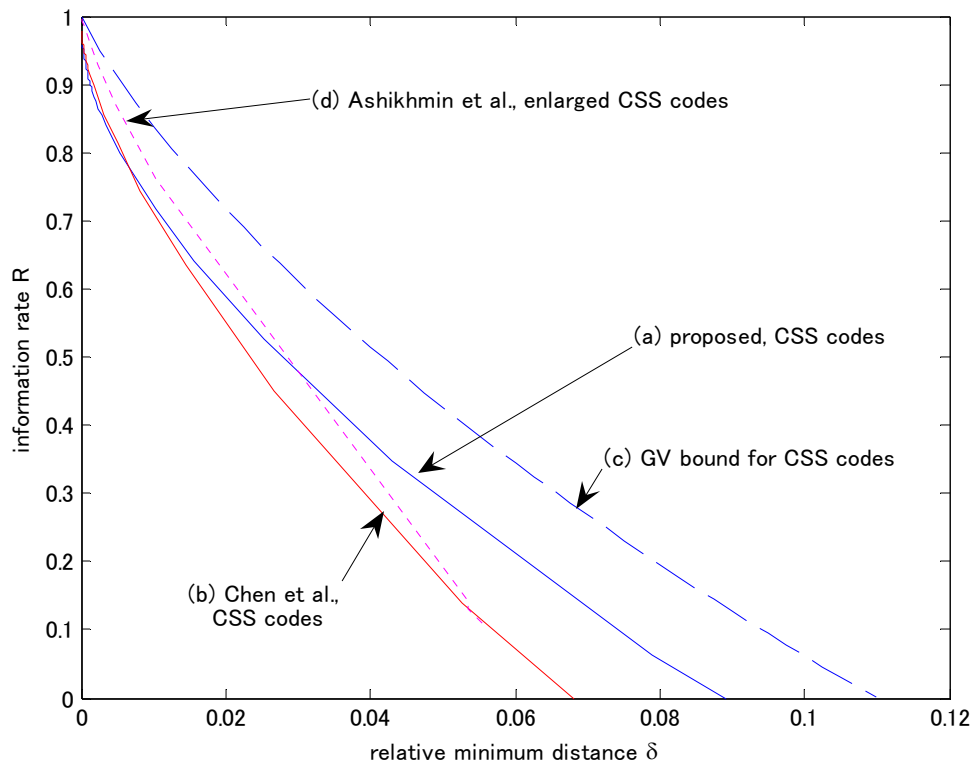


図2 最小距離の比較

(3) 代数的量子誤り訂正符号の具体的構成法と符号理論的評価基準(c2)を用いた評価 [5]
符号の構成問題を扱った従来結果は、(c1)より扱いの簡単な(c2)を評価基準としたものが殆どであった。提案の構成法(1)が従来より優れていることを示すためこの基準を用い、従来結果と比較した(図2)。

(4) 代数的量子誤り訂正符号の情報セキュリティへの応用と解析 [6]
共役符号対(C1, C2)のセキュリティ問題への応用は研究提案書の段階から強調してきたが、その解析を進めた。具体的には量子鍵配送などへの応用を想定してきたが、本研究では符号の設計が問題であるから、量子鍵配送の中から本質的に関係する符号化の部分だけを抜き出したような問題の定式化を使った方が議論しやすい。そのような問題は情報理論で知られ盗聴通信路(wiretap channel)と呼ばれる。このモデル上で共役符号対の性能を解析した。量子版の盗聴通信路も既に提案されているが、このモデル上で、本研究で得られた共役符号対が有効性であるのは、過去の解析結果から容易に推察できる。しかし、古典の盗聴通信路について本提案の符号がどの程度の性能を持つかは自明ではない。したがって、これを定量的に評価した。代表的な盗聴通信路について評価したところ、本研究成果(2)で得られた符号による達成可能レイトは理論的な限

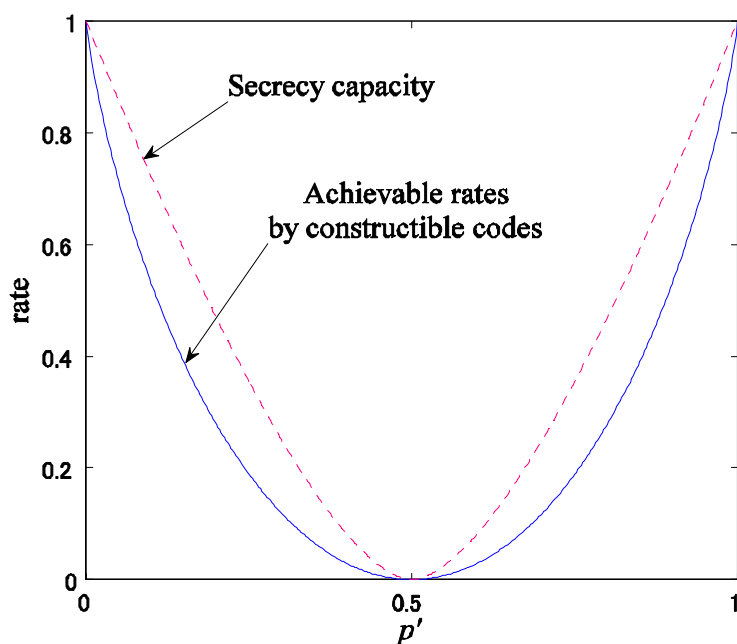


図3 盗聴通信路における本提案の符号による
達成可能レートと理論的限界 Secrecy capacity

界に迫るものであった(図3). この例では盗聴通信路は正規通信路が無雑音で盗聴者への通信路がビット反転確率 $p_E = 1/2 \pm (p'(1-p'))^{1/2}$ の二元対称通信路からなる. 正規通信路も二元対称通信路の場合は, このグラフを下に平行移動したものが得られる.

- [1] G. D. Forney, Jr., *Concatenated Codes*. MA: MIT Press, 1966.
- [2] P. Delsarte and P. Piret, "Algebraic construction of Shannon codes for regular channels," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 28, no. 4, pp. 593–599, Jul. 1982.
- [3] M. Hamada, "Concatenated conjugate codes," 2006, submitted to *IEEE Trans. Information Theory*. E-Print, arXiv: quant-ph/0610194.
- [4] M. Hamada, "Constructive conjugate codes for quantum error correction and cryptography," 2006. E-Print, arXiv:cs/0703141 (cs.IT).
- [5] M. Hamada, "Minimum distance of concatenated conjugate codes for cryptography and quantum error correction," 2006, submitted to *IEEE Trans. Information Theory*. E-Print, arXiv:quant-ph/0610195.
- [6] M. Hamada, "An algebraic and quantum theoretical approach to coding on wiretap channels," 日本応用数理学会 2007 年度年会予稿集, pp.166–167, 2007.

5. 自己評価

当初の予想より一般性のある結果を見出すことができた. 特に成果(1)の符号構成法は CSS 符号という重要なクラスの量子符号において, 一般的な符号と符号とを組み合わせる新たな符号を生成する強力な手法である. CSS 符号は暗号への応用が可能であるため重視してきた. またこの構成法の発見を動機として成果(4)や以下の7.④著書・出版物の3に著した成果のような基礎性の高い結果も得た. 特に提案の符号は量子通信・計算に留まらず, 古典における盗聴下での通信にも有用であることを立証した. 以上により, 研究提案で掲げた研究のねらいと具体的な目的は達成された.

6. 研究総括の見解

量子計算機の実現に向けた新しい量子誤り訂正符号の提案, 設計, 開発, 性能解析を古典符号とシンプレクティック符号の類似性を利用し, 古典で知られている符号設計の方法論に根ざした方法でシンプレクティック符号の設計を行った.

この方針に基づき主要成果として、代数的量子誤り訂正符号の一般的構成法と一般的構成法を用いた高性能な代数的量子誤り訂正符号の明示的構成に成功し、情報セキュリティへの応用と解析を行った。

この研究は、この分野に本質的な貢献をしていることを、確認した。

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. Mitsuru Hamada, “Quotient Codes and Their Reliability,” *IPSJ Digital Courier*, vol. 1, no. 0, pp. 450–460, Oct. 2005 [招待論文] http://www.jstage.jst.go.jp/article/ipsjdc/1/0/1_450/article (Also appeared in *IPSJ Journal*, vol. 46, pp. 2428–2438, no. 10, Oct., 2005).
2. Mitsuru Hamada, “Conjugate Codes for Secure and Reliable Information Transmission,” *Proc. IEEE Information Theory Workshop*, pp.149–153, 2006.
3. Mitsuru Hamada, “Conjugate Codes and Applications to Cryptography,” Tamagawa University research review, no.12, pp. 19–25, 2006.
4. Mitsuru Hamada, “Algebraic and Quantum Theoretical Approach to Coding on Wiretap Channels,” *Proc. The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 2008. In press.

②特許出願

研究期間累積件数:2件(出願公開前[国内1件、国外1件])

③受賞

なし

④著書・出版物

1. Mitsuru Hamada, *Cryptography Research Perspectives (そのうちの一章)*, Nova Science Publishers, Inc., 2008 出版予定.
2. 濱田 充, “Applications of Conjugate Codes to Wiretap Channels,” *信学技報*, vol. 107, no. 346, ISEC2007–98, pp. 1–8, 2007.
3. 濱田 充, “Quantum Coding as a Proof Technique for Secure and Reliable Information Transmission,” *信学技報*, vol. 107, no. 422, IT2007–31, pp. 35–40, 2008.

⑤学会発表

1. 濱田 充, “An Upper Bound on the Decoding Error Probability of Additive Codes,” 第11回量子情報技術研究会 QIT2004–65, 2004
2. 濱田 充, “An Algebraic and Quantum Theoretical Approach to Coding on Wiretap Channels,” 日本応用数理学会 2007 年度年会.
3. 濱田 充, “Applications of Conjugate Codes to Wiretap Channels,” 電子情報通信学会研究会 (ISEC), 2007.
4. 濱田 充, “Quantum Coding as a Proof Technique for Secure and Reliable Information Transmission,” 電子情報通信学会研究会 (IT), 2008.
5. Mitsuru Hamada, “Algebraic and Quantum Theoretical Approach to Coding on Wiretap Channels,” *The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, 2008.

⑥招待講演

1. Mitsuru Hamada, “Conjugate Codes for Secure and Reliable Information Transmission,”

【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

量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性

2. 氏名

森越文明

3. 研究のねらい

量子情報科学には大きく分けて二つの側面がある。一つは、よく知られているように、量子論的な現象を用いた効率的な情報処理の方法を探究し、実現していくというものである。もう一つは、情報処理という舞台を用いることにより、伝統的な物理学とは異なる視点を導入して、量子論そのものについて考え直してみようというものである。本研究課題は、この分類でいうと、二つ目の範疇に属するものである。

前者の分野においては、量子暗号や量子計算などのさまざまなプロトコルやアルゴリズムが提案され、実際に、実現に向けた研究が進められている。同時に、それらの背後にある量子情報処理特有の原理を解明し、新たな量子情報処理の方法の発見に生かそうとする研究も行われている。

しかし、残念ながら、量子論そのものに対する直観を我々が十分に持ちあわせていないために、これらの理解を深めていくというのは一筋縄ではいかないというのが実態である。

一方、後者の分野では、情報処理というある意味で操作的なアプローチを導入することにより、量子論の枠組みそのものを全く異なる視点から捉え直すことを目指している。

実際、この二つは表裏一体であり、前者の具体例なくして後者にとっての新たな視点の導入は難しいだろうし、また逆に、後者の理解が進むことによって、前者の研究の見通しがよくなる可能性がある。したがって、理想的には、量子情報科学の研究はこの二つの分野が互いに刺激しあいながら、螺旋的に進んで行くべきものであると考える。

このような考えのもとに、本研究課題では、量子論の基礎に対する深い理解に資することを念頭におきながら、量子情報処理の背後にある原理についての知見を得ることを目指す。具体的には、情報処理において古典と量子の違いを表す一つの境界線(もしくはその境界線の引き方)を見出そうとするものである。

4. 研究成果

現在までのところ、我々は量子論の公理を手にしていて、それを基にさまざまな量子現象を説明したり、予言したりすることに多大な成功を収めている。しかし、量子現象の多くが我々の直観に反するものであることもまた確かであり、それ故に、量子情報処理の背後にある原理を理解したり、新たなプロトコルやアルゴリズムを見出すのが困難となっている。

量子情報処理の分野において、通常の物理学に加えて必要になるのは、量子系を積極的に「操作して」情報処理を行うという観点である。これには、現象を観測して説明するという伝統的な物理学の方法とは、(両立はするが)大きく異なるパラダイムが必要となる。

そこで、量子系を「操る」という視点から、むしろ新たに「量子論的な直観」とでも呼ぶべきものを養えないだろうか？ というのが、本研究課題の根底に流れる思想である。

つまり、情報処理という文脈において、「できること」と「できないこと」の区別を徐々につけていくことにより、最終的には、量子系に対するまったく新しい「直観」を養おうということである。そもそも、この古典的な世界に対する我々の直観も、もとをただせばいろいろな経験もしくは教育を通して得られたものであろうから、同様に、量子の世界でもそれらを積み重ねていくことが近道になるのではないだろうか。

もちろん我々は、さまざまな実験や理論計算を通じて数々の経験を積んできているはずだが、情報処理という文脈において、操作的なアプローチを取ることによって、量子の世界における「経験」をより積極的に得られるようになることを期待している。

「できること」と「できないこと」の境界線という意味では、既に知られている例として、例えば、量子論における複製不可能(no-cloning)定理がある。情報のコピーを作ることが、古典的には可能だが、量子論的には不可能であるというものであり、確かに我々の経験や直観に反する事実ではある。

しかし、量子情報理論の分野の者は、この事実既に「慣れて」しまっていて、ある意味で「直観的に」理解しているといっても過言ではないだろう。例えば、量子情報に関する何らかの複雑な議論をしているときに、もしも途中で結果的にコピーすることになるような過程が含まれていたとすると、その議論はどこかおかしいと即座に気がつくことができる。

上記のような例をどんどん集めて、(願わくは)体系化できたとすると、その暁には、通常の公理を出発点とするアプローチに頼った量子論の理解だけでは決して得られないような、より「厚み」のある理解というものを手にすることができるのではないだろうか？

このような壮大な夢の達成を本研究課題において目標とするのはあまりにも無謀だが、それに向けて、上記のような境界線をひとつでも見出そうというのが本研究の目指すところである。

境界線の例として他には、Bell 不等式がある。これは、局所实在論(古典論を含む)と量子論の区別をつけるものであり、複製不可能定理のときほど身近な意味での情報処理ではないが、不等式の破れとして古典と量子の区別をつけることができる。エンタングルした状態が示す非局所性の本質を露にする不等式という意味では、むしろ、量子情報理論の分野をさががけていたと言える。

本研究では、Bell 型の不等式の議論を情報処理の視点と融合させることにより、ある場合において、古典情報処理と量子情報処理の違いを露にする新たな不等式を導いた。さらに、その不等式を上記で述べたような「境界線」の一つと考え、その理解を深めていくことを試みた。

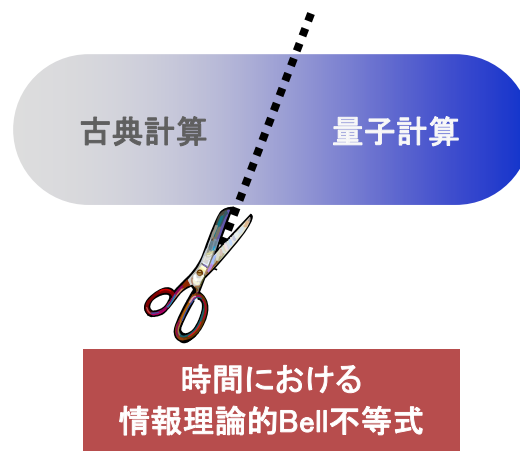


図1 量子計算と古典計算の境界線の一つとしての、時間における情報理論的Bell不等式。

量子計算が古典計算より速いというとき、それは通常、計算ステップ数を比較している。量子計算がなぜ古典計算より速いのかを解明するのは、量子情報科学における最も重要な課題であると同時に最難問の一つでもある。この問いに答えるためには、量子計算が古典計算とは本質的に異なる様子を、単なるステップ数の比較にとどまらない、何らかの新しい視点が必要なのではないかと考えている。

以下では、そのような視点の一例として、最終的な全ステップ数の比較ではなく、全体としての時間発展の質の違いを、古典計算と量子計算で比較する手法について紹介する。

エンタングルした状態が示す量子論的な非局所相関は、どんな古典系が示す相関よりも強く、そのことを端的に表すのが Bell 不等式である。これは、空間的な相関について古典と量子の区別をつける。

一方、量子計算では異なる計算ステップ間の相関が、何らかの形で古典計算の場合よりも強いのではないかというアイディアのもとに、空間における Bell 不等式に習って、ある種の時間における Bell 不等式の破れの形で、量子計算を特徴づけようと考えた。

時間における Bell 不等式のご概念は、情報処理とは直接の関係はないが、巨視的実在論というもの確かめるための方策として提案された Leggett-Garg 不等式に端を発する。ここでは、異なる時刻の間の相関に着目するという考え方を、情報処理の枠組みに適用してみることにする。

通常の、空間における Bell 不等式に関しては、情報処理の文脈になじみやすいものとして、情報理論的 Bell 不等式というものが Braunstein と Caves によって提案されている。その議論では、離れた 2 地点の間の相関を表すために、情報理論的な量である条件つきエントロピーを用いている。

本研究では、異なる計算ステップ間の相関について、古典的な計算過程で満たされるようなある不等式を導いた。その際に、異なる計算ステップの間の相関を、条件つきエントロピーで表すことにする。このような方針で得られた不等式が、量子計算において破られていけばよいわけだが、次に述べるように、実際にある種の問題においてはそうなっている。

ここで考えるのは検索問題と呼ばれている次の様な問題である。今、 2^n 通りの入力可能なオラクル(ブラックボックス)があり、それは、ある未知の入力 s に対しては 1 を出力するが、それ以外の入力に対しては 0 を出力するとする。ここで、オラクルの内部構造は未知とする。このとき、オラクルへの質問回数をできるだけ少なくして、 s を求めよ、という問題である。古典的には $O(2^n)$ 回必要だが、量子計算では、Grover のアルゴリズムを使うと、 $O(\sqrt{2^n})$ 回で済むことが知られている。

図 2 にあるように、計算過程において、隣り合うある任意の 2 ステップを選び、それらにおけるオラクルの出力の間の相関を条件つきエントロピーで表すことにする。そして、この相関を、全てのステップについて足し上げると、古典計算においては、 n ビット以上となることを示すことができる。

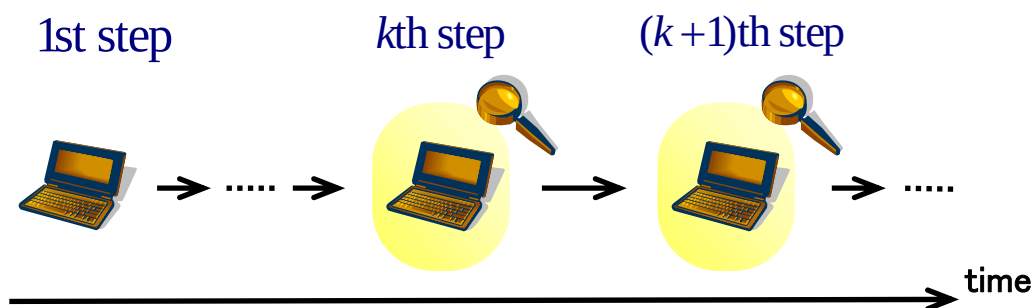


図 2 時間における情報理論的 Bell 不等式の破れを示す思考実験においては、二つの異なる計算ステップの間の相関を議論する。

これが、時間における情報理論的 Bell 不等式だが、量子計算において、この不等式は破られる。

この不等式の量子論における破れの起源はまだ解明されていないが、時間におけるある種の「非局所性」とでも呼べるようなものが効いているのではないかと予想している。

ちなみに、この不等式の破れを示す思考実験においては、多くの量子計算機を同時に走らせて(もしくは、一つのものを何度も走らせて)、各々に対して上記の量を求めて足し上げるため、量子

計算の高速性の恩恵にあずかることはできない。高速な量子計算を行うには、普通どおり、一回（もしくは小数回）だけ走らせればよい。ここで考えているのは、むしろ逆説的に見えるが、同じプロセスをたくさん走らせて、そこに現れる違いに着目することにより、量子と古典の違いを表そうという戦略である。ちなみに、このことは、量子性を際立たせるシナリオと、実際に役立つ情報処理のプロトコルは必ずしも一致するとは限らないことを示唆している。

また、この不等式の破れの物理的（操作的）意味だが、端的に言うと次の様になる。古典計算の場合は、計算の各段階を何人かに分担したとしても、最終的にはそれをみんなで持ち寄れば、答えを構成するには十分なだけの情報を持っていることになるが、量子計算の場合は、話はそう単純ではないということである。量子計算では、全ての計算過程をコヒーレントに行う必要があるため、不可逆性を引き起こすような観測を途中に入れてしまつては、このような結果になるのもある意味で自然と言えるだろう。しかし、逆に言うと、今回提案している不等式によって、この事実を数学的に表す新しい手法が得られたということになる。

このように、量子計算がなぜ速いのかという問いへの答えにはまだ程遠いが、量子計算が速い（もしくは古典計算と違う）というのはどういうことなのかを、今までにはない観点から捉える方法を見出すことができた。

一方、将来的に、情報処理以外の文脈で一般の量子系にこのようなアプローチを応用するために、少々異なる観点から、別の形の時間における Bell 不等式に対する考察を行った。それは、Vedral らのグループによって提案されているものだが、ある一つのキュービットに対して引き続いて観測を行う場合、異なる時刻における結果の間のある種の相関は、CHSH 型の Bell 不等式と同じ形の不等式を破る。

この形の時間における Bell 不等式の導出過程を丹念に再検討してみると、その不等式の破れは、量子論に特有の非決定性と密接な関係があることを見出した。この件と、上記の時間における情報理論的 Bell 不等式の場合とはすぐには結びつかない。しかし、この二つの関係を明らかにしていくことは、情報処理に限らない一般的な量子系の性質を今回のプログラムに則って見直すための一つの道筋となるであろう。

5. 自己評価

本研究課題では、量子情報処理における操作的な立場から、量子論そのものに対するより深い理解に資するような道具立てを作り上げることを目指してきた。これはかなり挑戦的なテーマでもあり、事実上、暗中模索に近い状態が続いたが、「時間における情報理論的 Bell 不等式」というものを何とか提案することができた。これは、量子論での（空間における）非局所性に関する Bell 不等式の議論と、量子情報処理における量子計算の高速性という、量子論の奇妙さを如実に表す二つの性質を融合させることによって得られたものである。

量子情報処理の威力は、量子論が持つ不思議さの新たな側面でもあり、だからこそ、量子情報科学は量子論を再考するための絶好の舞台となる。

ここでのアプローチでは、逆説的ではあるが、あえてその威力を発揮させないようなシナリオのもとで古典と量子の違いを比較することによって、量子情報処理の奇妙さを浮き彫りにした。その際に、量子論の基礎における伝統的な手法である Bell 不等式の議論とうまく融合させることができた点は、この研究の特徴の一つといえる。このように、量子計算の特性に対する今までにないような全くオリジナルな視点を導入することができた点が、本プロジェクトの最大の貢献といえるだろう。

しかし一方で、この新たなアプローチを研究期間中に十分に発展させることができなかった点は反省している。今後、さらに発展させて、将来的には量子論そのものに対する新たな見方を得られるところまでもっていきたいと考えている。

6. 研究総括の見解

Leggett-Garg 不等式に端を発する「時間における Bell 不等式」の概念を、Braunstein と Caves によって提案された条件付きエントロピーに対する「情報理論的 Bell 不等式」の形で定量化し、量子計算における Grover のアルゴリズムに対して確かに破れていることを示した。このことは量子

計算のみならず量子力学不思議の理解のうえで極めて示唆的である。この領域から、概念的に新しいことが提案されたことは特筆に値する。本人の自己評価は謙虚であるが、もっと自信をもって自己主張し続けることが肝要である。

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

F. Morikoshi, "Information-theoretic temporal Bell inequalities and quantum computation," Phys. Rev. A **73**, 052308 (2006).

F. Morikoshi, "Temporal analogue of information-theoretic Bell inequalities," AIP Conf. Proc. **889**, 369 (2007).

V. Vedral and F. Morikoshi, "Schrödinger's cat meets Einstein's twins: A superposition of different clock times," to be published in Int. J. Theor. Phys (2008).

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書・解説

森越文明, 「エンタングルメントと熱力学的構造」, 数理科学 2005 年 2 月号

森越文明, 「量子情報処理とエンタングルメント」, 光技術コンタクト 2006 年 11 月号

⑤学会発表

F. Morikoshi, "Information-theoretic temporal Bell inequality and quantum computation," The Ninth Workshop on Quantum Information Processing (QIP2006).

F. Morikoshi, "Separation between classical and quantum computations by Bell-type inequalities," Vienna Symposium on the Foundations of Modern Physics (2007).

森越文明, "Information-theoretic temporal Bell Inequalities" 日本物理学会第 61 回年次大会, 29pSA-8 (2006).

森越文明, "Temporal analogue of quantum nonlocality and information-theoretic temporal Bell inequality" 第 14 回量子情報技術研究会 QIT2006-19 (2006).

森越文明, 「情報理論的 Bell 不等式と『非局所性』」 日本物理学会第 62 回年次大会, 24aRG-12 (2007).

⑥招待講演

森越文明, 「時間における情報理論的 Bell 不等式と量子計算」, 高エネルギー加速器研究機構(KEK)研究会「量子論の諸問題と今後の発展」(2006).

【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
Dirk Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger 編・西野哲朗, 井元信之 監訳, 「量子情報の物理」(共立出版, 2007)「第8章 エンタングルメント精製」の翻訳を担当

⑤学会発表
なし

⑥招待講演
なし