

## 論文の内容の要旨

論文題目     ホモダイン測定とフィードフォワードを用いた  
                         ガウス型量子操作の研究

氏 名     吉川 純一

量子情報処理においては、古典的には実現できない性能を得られる場合がある。例えば量子コンピューターは、量子力学の特徴である重ね合わせの原理やエンタングルメントを用いて、或る種の計算を、古典的コンピューターを上回る速さで行う。そのような量子情報処理の実現のためには、量子状態を自在に操作することが必要となる。

量子状態の「操作」という言葉を使うときに、以下の2つの場合のどちらを指すのかを特に意識せずに使われることも多い。

1. 特定の量子状態の準備。或いは既知の量子状態に対する変換。
2. 未知の量子状態に対する変換。或いはエントロピーを保存する操作。

しかし実際には、以上の2つは根本的に異なるものである。未知の状態に対する、エントロピーを保存する、つまり情報のやり取りが無い操作はユニタリ変換であるのに対して、既知の状態に対する操作はユニタリである必要は無い。例えば量子テレポーテーションは后者であり、入力量子状態の情報を必要としない。

更には、量子状態を扱う上で、或る意味における「操作」として、測定を含めることもある。

3. 測定による量子状態の射影。

以上の3つは量子状態に対する異なる操作ではあるが、互いに関連し合っている面もある。例えば、非ガウス状態の生成は単一光子検出という測定を通して確率的に行われる。また、ユニタリ変換が測定に繋がる例として、間接測定を用いた、互いに非直交な状態への射影となる測定や、量子非破壊測定などがある。

本研究のテーマはフィードフォワードを用いた量子状態操作であるが、フィードフォワードは、1. 状態の準備または 3. 測定を 2. 量子状態のユニタリ変換に結び付けるものである。

量子情報処理においてフィードフォワードという言葉が何を意味するかというと、ユニタリ変換で構成される量子操作の途中に測定が入り、その後のユニタリ操作や測定の基底などを、その測定においてランダムに得られた結果に応じて変えていくことである。量子力学において測定は非ユニタリな過程で、波束の収縮を起こす。しかし、測定の数

と同数の既知の量子状態を補助入力として、フィードフォワード用の測定が実効的にその補助入力に対してのものになっていれば、フィードフォワードを含む量子回路全体の入出力関係をユニタリにすることが出来る。

そのようなフィードフォワードを用いた量子情報処理の最も有名な例は、量子テレポーテーションである。量子テレポーテーションではエンタングルメントを持つ2モードの量子状態を補助入力として、2モードの測定を行い、全体として1モード入力1モード出力の、恒等演算というトリビアルなユニタリ変換を行うものである。本研究では、量子テレポーテーションと良く似た手法を用いて、ガウス型の量子操作のデモンストレーションを行った。

本研究では、量子化された電磁場の直交位相振幅を量子情報処理の対象として扱っている。光は外界との相互作用が小さく、デコヒーレンスが起こりづらい。これは量子情報処理において大きなアドバンテージである。しかし、その裏返しの特徴として、高次の非線形性を得ることが難しい。また、ビームスプリッター以外の相互作用は効率が悪くなりがちである。そこで、測定とフィードフォワードの組み合わせを、高効率で実現できる限られた種類のユニタリ変換と組み合わせ用いれば、より多くの種類のユニタリ変換を高い効率で実現できるようになる。本研究はガウス型操作の範囲に有るが、将来的には非ガウスの領域においても、測定とフィードフォワードの組み合わせが有効なアプローチとなる可能性も有る。

本研究は、いくつかの題材があるが、いずれもホモダイン測定のフィードフォワードを用いたガウス型量子操作に関するものである。補助入力には、スクイズされた真空場を用いている。フィードフォワード用のホモダイン測定において、入力状態の情報は補助入力のアンチスクイズに隠されて原理的に得られなくなっているため、入力状態への測定のバックアクションが回避され、ユニタリに近い入出力関係となっている。

無限にスクイズされた補助入力を用いることが出来れば、ホモダイン測定において入力状態の情報は完全にアンチスクイズに隠され、フィードフォワードを用いて原理的には完全なユニタリ変換にすることが出来る。ただし、無限にスクイズおよびアンチスクイズされた状態は現実の物理系においては得ることは出来ない。そのためホモダイン測定では入力状態の情報を少しだけ得てしまい、そのバックアクションに対応する余分なノイズが混入する。これは連続量の量子情報処理の特徴である。例えば量子テレポーテーションにおいても、原理的にフィデリティ1に無限に近づくことができるが、厳密にフィデリティ1のテレポーテーションは実現されない。その代わり、連続量の量子情報処理は量子ビットの場合と異なり、ガウス型操作の範囲では決定論的に実現されるという大きなメリットが有る。

本研究は、既に吉川の修士論文で実現済みの、ホモダイン測定とフィードフォワードを用いたユニバーサルスクイザーを出発点として、以下の3つの方向性で発展させている。

- ・ユニバーサルスクイザーの時間領域化。
- ・多モードの相互作用への拡張。
- ・量子情報処理の測定ベース化。

多モードの相互作用には、量子非破壊相互作用および増幅器の実験が有る。どちらも2モードの相互作用になっている。また、測定ベースの量子情報処理とは、近年注目されてきている一方向量子計算のことである。以下にそれぞれの実験の概要を示す。

#### 時間領域スクイーズ

時間的に局在した或るモード関数で定義される量子状態に関して、スクイーズ操作を行った。3 dB および 6 dB の 2 つのスクイーズレベルにおいて真空およびコヒーレント状態の入力に対する出力状態を測定し、入力状態と比較することでスクイーズ操作になっていることを確認した。入力のコヒーレント状態の振幅は、ランダムに変化するものとした。つまり、同じ状態を送り続けてその平均を評価するという従来の形の実験では無く、各時間において独立に定義される量子状態に対する操作になっている。モード関数は、共振器の出力モードの自己相関関数に近いものを用いた。この実験は、将来的に光子検出器と組み合わせることを考えている。近い将来に、単一光子状態を入力として、スクイーズ実験を行う計画がある。

#### 量子非破壊相互作用

量子非破壊相互作用は、連続量における加算のゲートに対応する、2モードの相互作用である。これは量子非破壊測定を実現する相互作用として以前から考えられてきたものである。近年になって、一方向量子計算のリソースとなるクラスター状態の生成に使えるなど、量子情報処理の加算ゲートとしての観点から再び注目を受けている。量子非破壊測定や反作用回避測定に関しては過去にいくつもの実験があるが、目的が特定の可観測量の測定であるため、それらの実験においては一つの物理量の振る舞いのみを扱ってきた。しかし、量子情報処理に用いる場合には、位相空間全体での変換がどうなっているかが重要であるため、共役な物理量の両方がどう変換されるかを見る必要がある。本研究において初めて、量子非破壊相互作用の共役物理量間の対称性を実験的に示した。つまり、共役な2つの物理量において、シグナルとプローブの役割を入れ替えて、それぞれ量子非破壊測定の条件を満たした。更には、共役物理量の両方を見ることによってのみ明らかになる性質として、出力における2モードのエンタングルメントを実験的に確認した。以上の意味において、量子非破壊相互作用の世界で初めてのデモンストレーションとなっている。

#### 一様線形増幅器

増幅器には、位相に敏感なもの、全位相に対して一様なものがある。ここでは後

者の、一様な増幅器を実現した。位相敏感な増幅器は入力状態の位相に関する情報を知っている(または調べる)必要があるのに対して、一様な増幅器ではその必要が無い。その代わりに、大きな増幅度の極限で 3 dB の雑音指数が量子力学的に要請される。増幅器は、量子状態の複製(クローニング)の問題と密接な関わりがある。量子力学の有名な定理の 1 つに、未知の量子状態の完全な複製を作ることはできないという複製不能定理があるが、不完全な複製なら作ることが許される。一様な増幅は、ビームスプリッターと組み合わせることで、量子力学的に最適な量子複製になっている。増幅のゲイン 2 において実験的にデモンストレーションを行った。また、それをハーフビームスプリッターと組み合わせ、量子クローニングの実験を行った。

### 一方向量子計算

一方向量子計算は、巨大なエンタングルド状態に対して測定とフィードフォワードを繰り返すことで量子計算を行うものである。測定という不可逆な過程に基づいていることを、従来のユニタリな量子計算と対比して、一方向量子計算と呼ぶ。測定基底の選択とユニタリ変換が対応しているので、行いたい計算に応じてリソースを変更する必要は無く、ただ測定基底を適切に選ばれば良いという、量子計算の新しい方式である。単一モードの測定とフィードフォワードが最小構成単位となっており、それを繋げていくことで量子計算を行う。その、計算の最小単位を、ガウス型の範囲でデモンストレーションした。特に、コヒーレント状態の入力に対して出力の分散がショットノイズを下回ることを示し、この操作が非古典の領域にあることを示した。