

論文の内容の要旨

論文題目 シュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションの研究

氏名 李 憲之

1925年の Heisenberg の行列力学、1926年の Schrodinger の波動方程式による量子力学の定式化以来、量子力学の解釈に関して盛んに議論が行われてきた。その議論の中で、量子力学に対する疑義として、二つの思考実験が 1935年に提出された。一つは、Einstein、Podolsky、Rosen が量子力学から導き出した EPR 相関と呼ばれる非局所長距離相関現象、もう一つは、Schrodinger が量子力学の基本原則である重ね合わせの原理を基にして考え出したシュレーディンガーの猫と呼ばれる思考実験である。彼らは、これらの量子力学が許す不思議な現象を持ち出すことで、その不完全性を指摘しようとした。

現在においても量子力学の解釈についての議論は続いているが、その一方で、現在に至るまでに、量子力学を利用して様々な科学技術が発展してきた。その中でも量子情報処理の分野は現在も発展途上であり、様々な物理系において盛んに研究が行われている。量子力学の特性を直接的に利用することで、量子計算においては、ある種の計算を古典的なコンピュータを上回る速さで行えること、量子通信においては、原理的に絶対盗聴不可能な通信が可能となることが知られている。そこで利用される量子力学の特性とは、先述の二つの量子力学に対する疑義において強調された、量子力学特有の「不思議な現象」に代表される。一般的に言えば、EPR 相関は量子エンタングルメントの一つ、シュレーディンガーの猫とは巨視的な状態の重ね合わせの一つであり、この「量子エンタングルメント」と「状態の重ね合わせ」をいかに上手く利用することが出来るかが、量子計算、量子通信において重要な要素となっている。

量子エンタングルメントの生成は 1982年に Aspect によって実験的に確認されて以来、光、原子など様々な系において生成が実現されている。その量子エンタングルメントの応用例として代表的なのが、量子テレポーテーションである。本研究のテーマでもある量子テレポーテーションとは、リソースとしての量子エンタングルメント及び古典情報の転送を用いて、任意かつ未知の量子状態を転送することが出来る量子情報処理プロトコルである。理想的な量子テレポーテーションでは入力状態と出力状態は一致するので、量子テレポーテーション自体は恒等演算である。しかし、量子テレポーテーションの要素技術を応用することによって、様々な量子情報処理のプロトコルが可能になることが知られており、量子テレポーテーションをある物理系で高い精度（フィデリティ）で行うことが出来るようになれば、その物理系での量子コンピュータの実現に繋がると目されている。そして、その量子テレポーテーションのフィデリティを向上させるためには、リソースとして使用される量子エンタングルメントの実効的な相関の強さをできるだけ向上させる必要がある。

一方、状態の重ね合わせに関しては、連続量量子情報処理の分野で、「シュレーディンガーの猫状態」と呼ばれる光の量子状態に関する研究が現在活発に行われている。量子的な重ね合わせの状態というのは、その状態の系の規模が大きいと外界とのデコヒーレンスによって急速にいずれかの状態に収縮してしまうので、マクロな系では実現は難しいとされている。量子光学において最も単純な重ね合わせの状態というのは2つの位相の異なる光の状態の重ね合わせの状態であり、これがシュレーディンガーの猫状態と呼ばれている。このシュレーディンガーの猫状態を生成するためには3次以上の非線形性が必要だが、単一光子レベルの微弱光に対してそのような高次の非線形光学効果を十分な強さで持つ光学媒質は現在に至るまで発見されていない。ところが、1997年に **Dakna** によって量子エンタングルメントと光子検出による量子状態の射影を用いて、実効的に高次の非線形性を誘起する方法が提案され、この方法を用いることで、2004年以降に実験的にシュレーディンガーの猫状態を実験的に生成することに成功したという報告が相次いだ。この状態は疑似確率分布の1つである **Wigner** 関数の形が非ガウス型となるのが特徴であるが、条件によっては負の値を取り得る。**Wigner** 関数が負の値を取ることは、ガウス型状態操作だけでは実現できない量子状態であることの十分条件であり、状態が非古典的であることの強力な証拠となる。

ところが、上記のシュレーディンガーの猫状態を用いて、何らかの量子状態操作を行ったという報告は未だ成されていない。量子情報処理の分野において、上記のシュレーディンガーの猫状態の生成に使われた3次以上の非線形性は非常に重要である。1999年に **Lloyd** と **Braunstein** による提案によると、3次以上の非線形性をガウス型操作と組み合わせれば任意の量子状態操作が可能になるという。ガウス型の量子状態操作に必要な要素技術は量子テレポーテーションに集約されており、3次以上の非線形性を用いて生成された量子状態であるシュレーディンガーの猫状態に対し量子テレポーテーションを実現することは任意の量子状態操作を実現する上で非常に重要である。

本研究では、光子検出による測定誘起法を用いてシュレーディンガーの猫状態を生成し、これの量子テレポーテーションを行うことに取り組んだ。シュレーディンガーの猫状態は、その生成過程に光子検出という時間に依存した過程を持つため、生成された状態は光子検出が行われた時刻の周辺に局在しており、時間領域での取り扱いが必要になる。すると、フーリエ変換における時間と周波数の関係から、状態はその局在する時間幅に応じて、周波数の領域では広い帯域幅を持つことになる。従来の連続量量子情報処理における量子テレポーテーションでは、狭帯域なサイドバンド成分のみを扱うことが主流だったので、シュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションを実現するには、新たに量子テレポーテーションの広帯域化が必要となる。また、シュレーディンガーの猫状態の持つ特徴である **Wigner** 関数の負の値は、状態の非古典性の強力な証拠となるものの、排反的に、ロスなどの外界とのデコヒーレンスに対して非常に脆弱である。量子エンタングルメントが

有限であることによる量子テレポーテーションの不完全性もまた状態を劣化させるが、理論的に量子テレポーテーションのフィデリティが **no-cloning limit** と呼ばれる $2/3$ 以上でないと **Wigner** 関数の負の領域を送ることは出来ないことが分かっている。そこで、量子テレポーテーションのリソースとなる量子エンタングルメントの広帯域化及び必要な帯域におけるノイズの除去に取り組むことによって、広帯域かつ高フィデリティの量子テレポーテーション系を作製した。そして、入力状態として高純度のシュレーディンガーの猫状態を生成し、量子テレポーテーションを行った結果、出力状態においても **Wigner** 関数の負の値を観測することに世界で初めて成功した。