

論文審査の結果の要旨

氏名 龍田 真美子

本論文は、マクロに異なる量子状態の重ね合わせを用いた、量子力学的な計測で得られる精度を論じたもので、8章からなる。

第1章では、序論として、本研究の動機を述べている。マクロに異なる量子状態の重ね合わせの代表例として、スピンの完全偏極状態の重ね合わせである Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 状態がある。先行研究によって、この GHZ 状態を用いると、古典的な (分離可能な) 状態に比べて計測の精度が向上することが知られている。しかし、GHZ 状態は特殊な例である。そこで、本研究では、マクロに異なる量子状態の重ね合わせに相当する、より一般的な状態を用いた場合に得られる計測精度を考察する。

第2章では、量子計測についてレビューを行っている。まず、 N 個のスピン $1/2$ を磁場に結合させることによって、磁場を計測する Ramsey 型のプロトコルを定義する。このプロトコルにおいて、 N 個のスピンが (量子もつれのない) 分離可能状態にあるとき、計測誤差は $1/\sqrt{N}$ に比例してスケールする。これは標準量子限界と呼ばれる。一方、 N 個のスピンが GHZ 状態にあるとき、適当なプロトコルによる計測誤差は $1/N$ に比例し、標準量子限界を超えた計測精度が達成できる。これを Heisenberg 限界と呼ぶ。

第3章では、マクロに異なる量子状態の重ね合わせに相当する「Schrödinger の猫状態」の一般的な特徴づけについてレビューを行っている。多くの異なる量子状態の重ね合わせで書ける状態でも、異なる基底を取ると分離可能であることが明らかになる場合がある。従って、与えられた量子状態について、それが「Schrödinger の猫状態」であるかどうかを判別する特徴量が必要になる。Morimae と Shimizu は、局所的な物理量の和として与えられるマクロな物理量に注目し、密度行列で記述される混合状態についても適用できる指数 q を提案した。これらは $1 \leq q \leq 2$ の値を取り、分離可能状態では $q=1$ 、GHZ 状態においては $q=2$ である。逆に、 $q=2$ であれば、一般化された Schrödinger の猫状態 (Generalized Cat State, GCS) であるとみなせる。

第4章～第7章に、本論文によるオリジナルな研究成果が示されている。まず、第4章で、 N 個のスピン $1/2$ が指数 $q=2$ を持つ GCS にある場合について Ramsey 型のプロトコルを一般化し、理想的な条件下では磁場の計測誤差が $1/N$ に比例する Heisenberg 限界を達成できることを示した。ただし、このプロトコルの準備として磁場を $1/N$ のオーダー

の精度で知っている必要があるが、計測時間を増やすことにより、計測誤差を当初のものより減らすことができる。

第5章では、より現実的な条件下での計測を考える第一歩として、ノイズの影響による非マルコフ型の脱位相を取り入れた議論を行った。この条件下では、GHZ状態にある N 個のスピンをを用いた計測では誤差が $1/N^{3/4}$ に比例し、脱位相がない場合の Heisenberg 限界には及ばないものの、標準量子限界を超える精度を達成できることが先行研究により知られている。本研究では、 N 個のスピンの指数 $q=2$ を持つ GCS にあれば、GHZ 状態と同様に、誤差が $1/N^{3/4}$ に比例し標準量子限界を超えるスケーリングを達成できることを示した。

第6章では、指数 $q=2$ を持つ GCS の具体例として、“Mamineko”状態を提案している。これは、スピンを磁場で偏極させておき、全スピンの磁化の磁場と垂直な成分を（ポーア磁子の精度で）射影測定することで、原理的には簡便に実現できる。さらに、この状態を用いた量子計測では、熱平衡状態を用いた計測に比べて精度が改善され得ることを示している。

第7章では、上述の Mamineko 状態をより現実的な条件下で生成することを論じている。現実には磁化の測定の精度は低く、第6章で示した方法では実現が難しい。そこで、低い精度での磁化測定を多数回繰り返し、Mamineko 状態に近い状態を生成することを提案している。例としてダイヤモンド窒素-空孔中心と超伝導磁束キュービットを組み合わせた系を考え、600 回の繰り返し測定によって指数 q が 1.86 に達することを示した。この状態は $q=2$ を持つ完全な GCS には及ばないものの、誤差について標準量子限界を超えたスケーリングが達成できる。

第8章では全体のまとめが行われ、今後の展望が述べられている。

以上のように、本論文では、量子状態がマクロに異なる量子状態の重ね合わせ（GCS）であれば、その状態を用いて量子計測の精度を高めることができることを見出した。これは、GHZ 状態について既に知られていたことの一般化であるが、特定の状態を超えた知見を得たことの学術的な意義は高い。また、将来の実験的実現や量子測定への応用の可能性を広げるものである。なお、本論文は清水明氏、松崎雄一郎氏との共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると結論した。