

## 量子測定における誤差・擾乱の計測と不確定性関係

枝松 圭一 〈東北大学電気通信研究所〉

金田 文寛 〈東北大学電気通信研究所/University of Illinois〉

So-Young Baek 〈東北大学電気通信研究所/Duke University〉

小澤 正直 〈名古屋大学大学院情報科学研究科〉

量子力学には「不確定性関係」(「不確定性原理」ともいう)として知られている関係式があり、例えば位置と運動量といった非可換な物理量を同時に決定することはできないとされている。しかしこの「不確定性関係」には実は二つの異なった種類が存在することは、あまり認識されていない場合が多い。その一つは、量子状態に付随する「物理量のゆらぎ」の間の関係であり、もう一つは物理量の測定における「正確さ」あるいは「測定誤差」とその測定が別の物理量に与える「擾乱」との間の関係である。以前は、量子力学における測定過程の研究と言えば一種の禁断の領域であって、堅気の研究者が立ち入るところではないと言われていたこともあるやに聞くが、近年、量子測定過程についての理解は大きく進んだ。そして、測定における誤差と擾乱およびそれらの間の不確定性関係について、従来の理解を塗り替える理論的研究が進展するとともに、その実験的検証も可能となってきた。

本稿では、量子測定における誤差・擾乱の不確定性関係についての最近の研究の進展について概説するとともに、筆者らによる、光子の偏光を用いた誤差、擾乱の計測と不確定性関係の検証実験について紹介する。まず、前述した二種類の不確定性関係の違いについて述べた後、測定誤差と擾乱の定義、およびそれらの間の不確定性関係に関して、「 $\gamma$ 線顕微鏡の思考実験」を基に

1927年に Heisenberg が提唱した関係式 (Heisenberg の不等式)、2003年に小澤が提唱した関係式 (小澤の不等式)、および 2013年に Branciard が提唱した関係式 (Branciard の不等式) について説明する。次に、量子測定における測定誤差と擾乱の実験的計測方法について概説した後、光子の偏光に関する測定誤差と擾乱の計測、およびそれらの間の不確定性関係の検証結果について報告する。筆者らが行った実験では、対象系の状態をほとんど乱すことなく物理量を計測する手法 (弱測定法) を用いて、光子の縦横方向の偏光に関する測定誤差と、その測定によって生じる  $\pm 45^\circ$  方向の偏光に関する擾乱を精密に計測した。その結果、Heisenberg の不等式が破れており、小澤および Branciard の不等式は成立していること、本実験における測定誤差と擾乱の不確定性関係が、Branciard の不等式が予言する下限に近接していること、等が明らかとなった。

量子測定における誤差と擾乱、およびそれらの間の不確定性関係は、私たちがミクロの自然についてどこまでを知ることができるのか、その根本に深く関わる問題でもある。本稿で述べるように、最近の理論的、実験的研究の進展によって量子測定過程についてのより正しく正確な理解が得られるようになりつつあり、基礎・応用の両面から今後のさらなる発展が期待される。

## —Keywords—

**量子測定:** 量子力学の原理に基づいた物理量の測定過程。古典的には、位置や運動量などの「物理量」は系の状態に従って決定論的に定まり、対象系の状態を変化させずに物理量の正確な値を得る「理想測定」の存在を暗黙に仮定する。一方、量子測定では、測定で得られる値の集合 (スペクトル) および各々の値が得られる確率は対象系のみならず測定過程にも依存する。また、測定過程が対象系に及ぼす反作用によって対象系の状態は変化し、「擾乱」を生じる。