

2012年1月16日

ハイゼンベルクの 不確定性原理を破った！ 小澤の不等式を実験実証



「小澤の不等式」。数学者の小澤正直・名古屋大学教授が2003年に提唱した、ハイゼンベルクの不確定性原理を修正する式です。小澤教授は30年近くにわたって「ハイゼンベルクの不確定性原理を破る測定は可能」と主張し続けてきましたが、このたびついに、ウィーン工科大学の長谷川祐司准教授のグループによる実験で実証されました。15日（英国時間）付のNature Physics電子版に掲載されます。[写真は小澤正直教授と長谷川祐司准教授]

小澤の式とはどんなもののでしょうか？ まず、物理の教科書をおさらいすると、1927年にハイゼンベルクが提唱した不確定性原理の式は、こんな形をしています。

$$\epsilon_q \eta_p \geq h/4\pi \quad (h \text{はプランク定数})$$

ϵ_q は測定する物体の位置の誤差、 η_p は位置を測定したことによって物体の運動量に生じる乱れです。もし位置が誤差ゼロで測定できたら運動量の乱れは無限大になり、測定してもめちゃくちゃな値がランダムに出てくるだけです。だから位置と運動量をとともに厳密に決める測定はできないと、これまでずっと物理の学生は教わってきました。

現代物理学の基本中の基本とも言えるこの式に、小澤教授は1980年代から異を唱えてきました。2003年にはハイゼンベルクの式を修正する「小澤の不等式」を提唱しました。こんな式です。

$$\epsilon_q \eta_p + \sigma_q \eta_p + \sigma_p \epsilon_q \geq h/4\pi$$

ハイゼンベルクの式から、項が2つ増えてます。新たに出てきた σ_q 、 σ_p というのは、それぞれ物体の位置と運動量が、測定前にもともと持っていた量子ゆらぎです。ハイゼンベルクは不確定性原理を考える際、この量子ゆらぎと測定による誤差や乱れを混同した形跡がありますが、量子ゆらぎというのはもともと物体に備わっている性質で、測定とは関係なく決まります。小澤教授はこれを厳密に区別した上で観測の理論を構築し、新たな不確定性の式を導きました。

小澤の式はハイゼンベルクの式と違って、 ϵ_q や η_p がゼロになっても、 σ_q や σ_p が無敵大であれば成立します（量子ゆらぎが無敵大になっても測定はできます）。つまり誤差ゼロの測定が実現できるのです。量子もつれになった2つの粒子ならそうした測定が可能であることも、理論的に示唆されました。

筆者が小澤教授に初めてお会いしたのは、この式が発表される前の2001年でした。物理学者の一部は小



小澤正直 名古屋大学教授

澤教授の提唱を高く評価していましたが、大半は「間違っ
てはいないさうだけど、よくわからないなあ」と困惑の表
情。実験で検証できるメドも立っていませんでした。です
がその後、小澤の不等式が登場し、量子コンピューターの
エラー確率の推定などに威力を発揮し始めると、物理学界
の反応は「なんか怪しい」から「これは本物だ」へと、見
る見る変わっていきました。2000年代後半には、少なく
とも量子情報の分野では、小澤の式を前提に議論が進めら
れるようになっていました。

ウィーン工科大学原子核研究所の長谷川祐司准教授らが、
中性子のスピン測定で小澤の不等式の実験をしているとの
噂を聞いたのは、今から2年ほど前です。そしてこのたび、
実験の結果が明らかになりました。

中性子のスピン（自転に相当します）の異なる2方向の
成分（x成分とy成分）とは、粒子の位置と運動量と同じく、
「片方を測定するともう片方の乱れが大きくなる」という
トレードオフの関係にあります。量子力学的に見て、両者
の関係は同じ不確定性で表されるのです。長谷川准教授ら
は、まずある中性子のx成分を測定し、続いて同じ中性子
のy成分を測定しました。

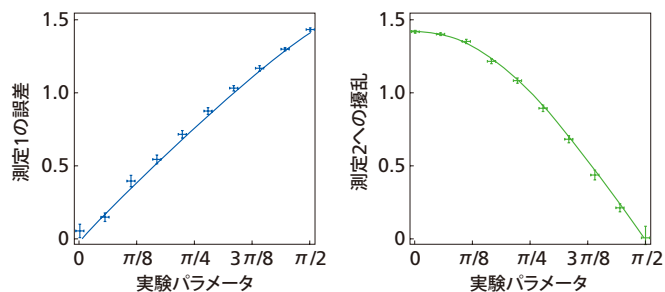
測定条件を変えていくと、x成分の測定誤差が大きくな
るにつれて（測定1）、y成分の乱れ（擾乱）が小さくなり
（測定2）、確かにトレードオフの関係になっています。注
目すべきは実験パラメータが0の点です。x成分の誤差は
限りなくゼロに近いので、ハイゼンベルクの式が正しけれ
ば、y成分の乱れは無限大に発散するはず。でも実際は
1.5弱に収まっています（縦軸は測定値が $h/4\pi$ の何倍か
を表しています）。両者を掛け合わせると $h/4\pi$ より小さ
くなり、ハイゼンベルクの不確定性原理を破っています！



長谷川祐司 ウィーン工科大学准教授

実際、上の測定ではどの実
験条件でもxの誤差とyの
乱れの積は $h/4\pi$ より小さ
く、ハイゼンベルクの式は
まったく成立しません。

スピンxとスピンyの量
子ゆらぎは量子力学から理
論的に求めることができ、
実際の測定結果もよく一致
しました。この値を用いて
小澤の不等式の左辺を計算
すると、どの実験条件でも



$h/4\pi$ を超え、小澤の不等式は確かに成立していることが
わかりました。

今回の実験は、量子力学を覆すものではありません。超
光速ニュートリノが本当だったら相対性理論はひっくり返
ってしまいますが、ハイゼンベルクが間違えていたとして
も、量子力学の基本方程式は変わりません。小澤の不等式
はそれ自体、量子力学の枠組みによって成り立っています。
ハイゼンベルクの式ではできないとされていた測定を可能
にする小澤の式は、むしろ量子力学の可能性を広げるもの
と言えるでしょう。

古典力学は、今がわかれば確実に未来が予測できる理論
です。これに対して量子力学ではあらゆるものが曖昧で、
確率的にしか決まりません。当初この「不確定性」は、何
かを作ったり実験したりする際のノイズであり、邪魔もの
だとみなされていました。ところが近年、このあいまいさ
は、古典力学では実現できない情報処理を可能にする新た
なりリソースと捉え直されるようになりました。小澤教授の
観測の理論は、量子力学の曖昧さの中身を厳密に整理し直
したものです。量子コンピュータや量子暗号など、新たな
リソースを利用する量子情報技術の研究の有力な武器にな
っています。

小澤の式が成立し、ハイゼンベルクの式が成立しない測
定があることが実験で確かめられた今、小澤の不等式が、
量子力学の基本的な世界観を構築する新たな柱となってい
くでしょう。ハイゼンベルクの式に代わって教科書に記載
される日も近いと思われます。

編集部・古田 彩

関連記事：

「物理学の常識に挑む数学者 小澤正直」(2004年9月号)

<http://www.nikkei-science.com/200409052.html>

「新たな不確定性原理を求めて」(2007年4月号)

<http://www.nikkei-science.com/page/magazine/0704/heisenberg.html>