

現代物理学の根幹である不確定性原理の破れを観測

— ナノの世界の深淵を語る基本原理に穴 —

この度、名古屋大学大学院情報学研究科の小澤正直教授とウィーン工科大学の長谷川祐司准教授を中心とする共同研究グループは量子物理学の基本原則とされてきた「不確定性原理」の破れを実験的に観測することに世界で初めて成功しました。この成果は基礎科学の発展にとどまらず、ナノサイエンスの新たな測定技術、重力波の検出、量子暗号の開発への応用が期待できます。

【ポイント】

高校の物理の教科書にも記述がある不確定性原理はナノの世界の深淵を語る基本原理として広く知られている。この原理はドイツのノーベル物理学賞受賞者ハイゼンベルクによって提唱され、どの測定も打ち破ることのできない究極の限界と考えられてきた。今回の研究は、不確定性原理を精密化した小澤の理論を基にして、長谷川グループの最先端の中性子光学実験装置を用いて行った。その結果、従来の不確定性原理に穴があることをスピン測定実験において観測することに成功した。この研究成果は、今の物理学の「常識」になっている基本原理を根底から覆すことを意味し、波及効果は基礎科学の発展はもとより、ナノサイエンスの新たな測定技術、重力波の検出、量子暗号の開発への応用が期待できる。

【背景】

現代物理学によると、位置と速度のような2つの物理量を正確に測定することは原理的に不可能である。この「不確定性原理」は、80年近くのあいだ、微視的世界の深淵を語る根本原理として、広く信じられ、高校の物理の教科書にも記されている。これにより、量子世界の非決定性が導かれ、現代物理学の世界観を支配するとともに、重力波検出などの超精密測定の限界や量子暗号の安全性などが導かれる。名古屋大学大学院情報科学研究科の小澤教授は、長年の量子測定理論の研究から、この現代物理学の基本原則に穴があることを理論的に突き止め、新たな関係式を提唱した。それと平行して、ウィーン工科大学の長谷川准教授らのグループは、基礎物理の実験的検証を目指して、中性子光学実験技術の開発を行ってきた。今回の成果はこの二つの最先端の研究グループの共同作業の賜物である。

【研究の内容・意義】

不確定性原理は1927年にドイツのノーベル物理学賞受賞者ハイゼンベルクによって提唱され、彼の提唱した「ハイゼンベルクの不等式」は、どの測定も打ち破ることのできない究極の限界と考えられてきた。しかし、その限界が実は打破可能であることが、1980年代の重力波検出限界

を巡る論争を解決した小澤の量子測定理論を通して明らかにされ、2003年に発見された「小澤の不等式」によって「ハイゼンベルクの不等式」に替わる新たな関係式が理論的に示された。しかし、これらの理論的成果を実験的に実証することは、これまで困難な課題として残された。今回、長谷川グループが開発した最先端の中性子光学実験装置により、この「ハイゼンベルクの不等式」の破れを実験的に観測することに世界で初めて成功し、同時に、「小澤の不等式」の成立も確認された。不確定性原理は科学者以外にもよく知られたテーマであり、このような自然科学の根本原理に関する定説を覆した学問的意義は大きい。この成果は、基礎科学の発展にとどまらず、これまで不可能とされた測定技術の可能性を大きく切り開き、ナノサイエンスでの新しい測定技術の開発の他、重力波の検出実験、量子暗号などの量子情報技術への応用が期待できる。また、理論、実験両面にわたり、日本人研究者が先導した独創的研究によって基礎科学の基本原則を書き替えたことは、特筆に値する。

【用語説明】

不確定性原理(ハイゼンベルクの不等式): 量子力学を開拓したドイツのノーベル物理学賞受賞者ハイゼンベルクがガンマ線顕微鏡の思考実験で導いた量子力学の根本原理。位置の測定誤差 ΔQ と運動量(質量×速度)の測定誤差 ΔP の間に

$$\Delta Q \Delta P \geq h/4\pi$$

が成り立つとされ、位置と運動量の同時測定は常に不可能であることが導かれる。

小澤の不等式: ハイゼンベルクの不等式の不備を改良した関係式で、どんな測定でも普遍的に成立する。測定前の位置の標準偏差と運動量の標準偏差を $\sigma(Q)$ 、 $\sigma(P)$ とすると、

$$\Delta Q \Delta P + \Delta Q \sigma(P) + \sigma(Q) \Delta P \geq h/4\pi$$

が成り立つとされ、測定前の状態によっては、位置と運動量の同時測定が可能な場合がある。

中性子: 陽子と電子とならび原子核の構成要素のひとつ。電荷がゼロ(中性)で核子である陽子よりもわずかに重い。一定の半減期で陽子と電子と反電子ニュートリノに崩壊する。振る舞いは量子力学に従い、様々な基礎物理の観測・測定実験に使われる。

スピン: 量子物理学における素粒子の基本特性のひとつで、角運動量の種類である。磁場との相互作用があり、まさに「小さな磁石」のように振舞う。測定値は量子化され、連続量ではなく不連続量として観測される。

重力波: 一般相対性理論において予言される波動であり、時空間のゆがみが波となって光速で伝わる現象である。その影響は極めて小さいので、検出は極めて困難であり、不確定性原理が検出限界にかかわるとされる。

量子暗号: 盗聴者の測定が不確定性原理で制約されることを利用して、盗聴検知が可能とされる暗号方式。量子計算機ができてでも破られない暗号方式として期待されている。

【発表雑誌】

雑誌名: Nature Physics (電子版: 1月15日(英国時間))

論文タイトル: Experimental demonstration of a universally valid error-disturbance
uncertainty relation in spin measurements

著者: Jacqueline Erhart, Stephan Sponar, Georg Sulyok, Gerald Badurek,
Masanao Ozawa, and Yuji Hasegawa

DOI: 10.1038/NPHYS2194