

ハイゼンベルクの不確定性を超えた！

-- 量子力学の不確定性のより深い理解に向けて --

長谷川祐司

ウィーン工科大学（元さきがけ研究員）

ハイゼンベルクの不確定性原理は、たぶん量子力学についての最もよく知られた根本原理の一つでしょう。そこでは、量子力学に従う「粒子」の全ての性質を同時に任意の正確さで決定することはできない、とされています。これはハイゼンベルク自身によって示されたガンマ線顕微鏡の例のように、従来、以下のように根拠づけられてきました。すなわち、或る一つの測定はいつでも必然的に測定対象の「粒子」に変化をもたらし、これによって別の性質の測定に誤差を生じさせる、ということです。しかし事態はそれほど単純ではありません。ウィーン工科大学の長谷川祐司準教授と彼のチームは、中性子実験を用いて量子的な不確定性に対する多様な寄与について解き明かし、名古屋大学の小澤教授の提示した不確定性の関係式が正しいことを確認しました。その理論によると、量子系に対する測定の影響が測定の不確定性の引き金になるということはいつでも成り立つわけではないのです。したがって、量子測定の不確定性についてのハイゼンベルクによる結論は新たに書き直す必要があります。不確定関係はさらに成立しますが、この不確定関係は「あらたな」不確定関係です。この研究結果は『Nature Physics』に発表されました。

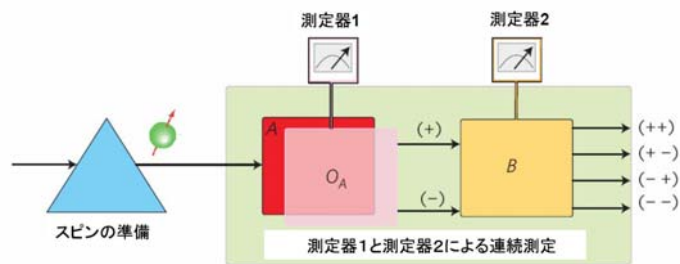


ウィーン工科大学の中性子源

位置か運動量か - でも両方ともではなく

あるいくつかの物理量の同時測定は不可能である、ということは争う余地はありません。問題はこの事実をどのように解釈しないといけないのか、ということです。長谷川準教授の研究仲間であるの Jacqueline Erhart は「いままで、私たちはガンマ線を使った、電子の位置を光によって測定するという、ハイゼンベルクの有名な思考実験について聞かされてきました。」と語ります。「粒子」の位置を正確に測定するためには、短い波長の(すなわち、エネルギーの高い)光を使わなければなりません。しかしながら、この測定によって「粒子」に大きな

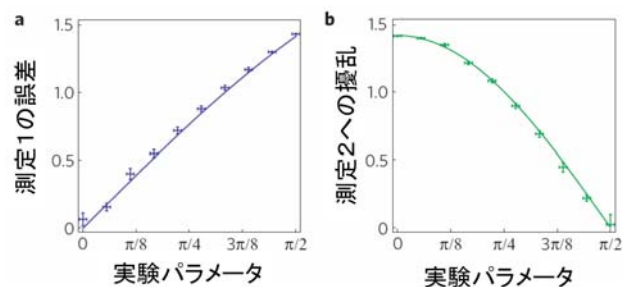
運動量が与えられることは避けられません。つまり、正確な位置の測定によって粒子の運動力が変わってしまうのです。位置の測定がより正確になればなるほど、それだけ粒子の運動量もより劇的に変わってしまうわけです。ハイゼンベルクは、「位置と運動量とを同時に精密に測定することはできない」と結論付けました。そして、量子力学においては、他の多くのペアになる物理量の測定にも同じ関係が成り立ちます。ハイゼンベルクは、これらの場合において、前段のある物理量の測定が後の物理量の測定量に擾乱を引き起こしているのだろうと考えました。第一の測定の誤差と第二の測定の擾乱の積は、一定の下限値を下回ることはないと、彼は考えました。



今回の実験のコンセプト

自然は不確定 —— たとえ測定がなくても

第一の測定が量子系を乱し、それによって第二の測定に誤差が生じるということは、しかしながら、問題の核心ではありません。「このような擾乱は古典力学にもあり、量子論に特有なことではありません。」と、ウィーン工科大学の **Stephan Sponar** は述べます。不確定性は、「粒子」の量子論的性格そのものに根差しています。つまり、以前から知られているように、量子力学的における「粒子」はある一定の速さとはっきりした運動方向を持った点状に分布する「もの」として考えることはできません。そうではなくて、「粒子」は波として振る舞い、そして波においては位置と運動量の両者を同時に任意の正確さで同時に定義できません。いわば「粒子」自身も自分がどこにいるのか、そしてどれだけ速いかわからないのです。すべては測定するかしないかにかかわらずです。

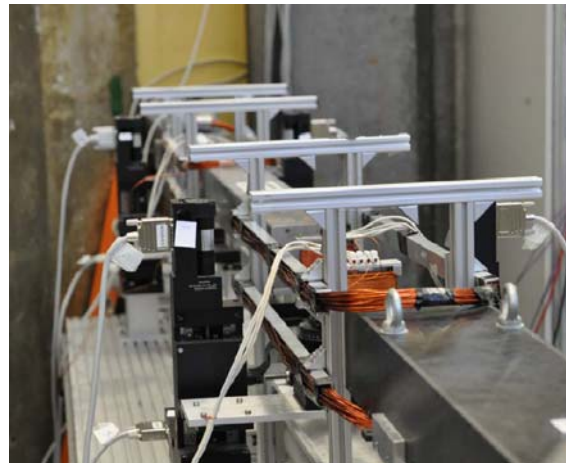


測定1の誤差と測定2への擾乱のトレードオフ

測定過程を考慮して —— 新しい不確定性関係

「この原理的な不確定性と測定による擾乱とを正確に記述するには、「粒子」と測定装置とを量子力学的に記述するということを、避けて通れません」と、Georg Sulzok (ウィーン工科大学)は説明します。まさに名古屋大学の小澤正直教

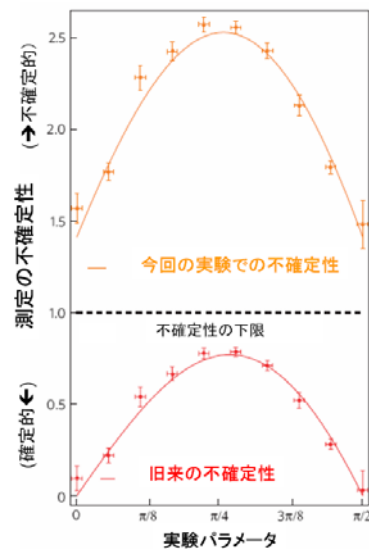
授は 2003 年にこれを成し遂げ、一般化された不確定性関係を導出しました。彼の不等式には様々な「種類」の不確定性が現れます。その一つは、測定によって量子系の状態が乱されるために測定結果に誤差をもたらす、測定自身に起因する不確定性です。これは、ハイゼンベルクが例示した位置と運動量の場合に相当します。そのほかには、測定とは無関係にすべての量子系にある、量子力学の根本的な不確定性に起因する不確定性が含まれています。



中性子のスピンを測定する装置

中性子とそのスピン

熟考された実験配置のもと、様々な不確定性の寄与の測定がウィーン工科大学の原子研究所の中性子源を用いて行われました。この実験では、「粒子」の位置と運動量ではなく、中性子のスピンの測定が行われました。スピンの X 方向成分と Y 方向成分とは、同時に正確に測定することは不可能です。これらは、位置と運動量と同じく、不確定性関係を示します。原子炉から出てきた中性子は、そのスピンがある方向にそろえられたうえで磁場にガイドされつつ進みます。そして、スピンの 2 方向成分を連続した二つの測定器によって測ります。測定器のあるパラメータをコントロールすることにより、様々な不確定性の項がそれぞれどのような関係になっているのかを決定できます。



新旧の不確定性関係

測定の影響は任意に小さくできる

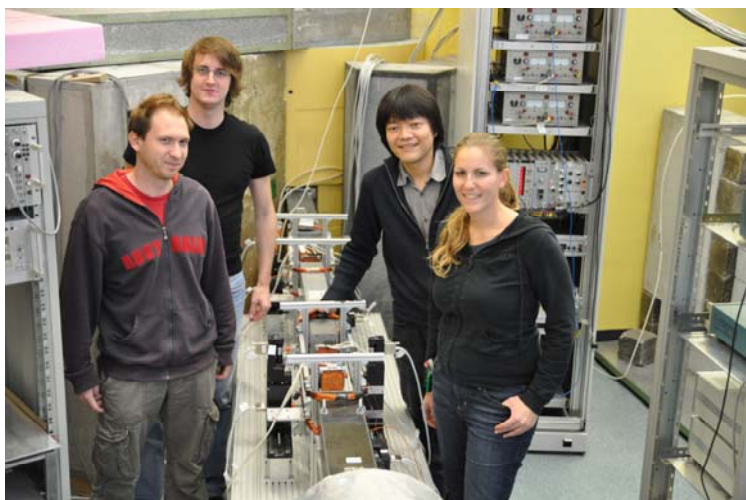
「これまでの信じられていたように、初めの測定の精密さが高まれば高まるほど、第二回目の測定に対する擾乱も大きくなります。しかし、測定誤差と擾乱の積は任意に小さくすることが可能です。そして、ハイゼンベルクが初めに定式化した不確定性原理の限界を超えて小さくすることもできます。」と、長谷川祐司準教授は語ります。また、測定がほとんど影響を与えない場合においても、

量子力学的には不確定なままです。「不確定性関係は、もちろん、依然として正しいです」と研究チームは断言します。ただ、その解釈や論拠には注意を払わなければなりません。「不確定性は、量子系の測定による擾乱の影響によるものではなく、「粒子」の量子的な性質によるのです。」

長谷川祐司

ウィーン工科大学

Atominsitut, TU-Wien, Stadionallee2, 1020 Wien, AUSTRIA



ウィーン工科大学研究チーム



長谷川（ウィーン工大）と
小澤（名古屋大）

ウィーン工科大学の発表

http://www.tuwien.ac.at/en/news/news_detail/article/7357/