



Title	Weak measurement and observation of a quantum paradox
Author(s)	横田, 一広
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/58258">https://hdl.handle.net/11094/58258</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

【64】

氏 名	横 田 一 広
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第 2 4 6 3 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 23 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科物質創成専攻
学 位 論 文 名	Weak measurement and observation of a quantum paradox (弱い量子測定と量子パラドックスの観測)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 井 元 信 之 (副査) 教 授 芦 田 昌 明 教 授 北 川 勝 浩

## 論文内容の要旨

量子力学では一般に、測定対象系に対して攪乱を与えることなく測定を行う事ができない。その為、時間発展の途中で物理量が如何なる値を取っているのか問うことが困難である。ところが、1988年にアハラノフ (Y. Aharonov)、アルバート (D. Albert)、ヴァイドマン (L. Vaidman) によって弱い量子測定 (weak measurement) と呼ばれる測定プロトコルが提案された。弱い量子測定は、測定対象系の時間発展を乱すことなく測定を行う手立てを提供する。特に、測定対象系が測定が行われる時刻の前後で、特定の始状態と終状態に見出されるといった条件 (pre-postselected system) 下においては、弱い量子測定の結果、測定器の針はアンサンブル平均として弱値 (weak value) と呼ばれる値を指し示す。

この論文では、弱い量子測定を主題とし、その興味深い適用例としてハーディーのパラドックス (Hardy's paradox) を取り扱う。ハーディーのパラドックスは、冒頭でも述べたように、量子力学では攪乱なしに物理量の値を決定することが困難であるという事を顕著に示した例である。量子力学では、実験で観測できるものを超えて物理量を論理的推論し議論を進めた結果、パラドックス (量子パラドックス) に陥るといことがしばしばある。ハーディーのパラドックスに対しては、実際にそのような反事実的な言明を検証することはできないとの批判があった。ところが、弱い量子測定を用いれば測定対象系を乱さずに測定をする事がもはや可能であり、従って、実験的に量子パラドックスを検証、さらには観測できる可能性がある。我々は、実際に光学系を用いて、ハーディーのパラドックスを弱い量子測定で観測した。その結果、我々は測定器が実際にハーディーのパラドックスを反映した値を指し示すのを確認したのである。

## 論文審査の結果の要旨

量子力学は始状態から終状態に至る確率だけを与え、途中の状態が何であるかは語らない。途中を強引に覗き見ると系を乱すので、異なるものを見ることになる。干渉計においてこれは顕著であり、粒子の干渉が起きている場合、すなわち粒子の行き先の頻度として干渉縞が見えている場合、一つ一つの粒子の経路を問うことに意味はない。

以上は量子力学の常識であったが、30年ほど前から「弱い量子測定」なる概念が知られ、これを用いれば系を乱さず「平均値」の測定が可能であることが近年Aharonovにより提唱された。特に準備する始状態と観測された終状態を固定した「条件付き測定」として途中の物理量を弱測定したときの測定値を「弱測定値」と呼ぶが、始状態と終状態を非直交状態に選ぶと、その物理量が取るはずのない値 (異常な弱測定値と呼ばれる) を示す場合があることが最近理論的に (量子力学の範囲内で) 示された。その最も顕著な例は「ハーディのパラドクス」と呼ばれる一種の二粒子干渉計において起こる。Aharonovの予言によれば、極めて不可解なことに、粒子Aが経路aを通る確率の平均値が1で、かつ粒子Bが経路bを通る確率の平均値が1であるのに、「粒子AとBが同時にそれぞれ経路aとbを通る積事象」の確率の平均値が0という結果になる。弱測定は平均値しか与えないと言えど、値が0 (または1) という場合、個々の事象においても確実にその経路を通らない (または通る) ことを意味する。

本博士論文はこの不可思議な予言を実験により実証したものである。この実験を実行するには、(1) ハーディの干渉計を組み立てること、(2) 一つの粒子 (AやB) が一つの経路 (aやb) を通る確率の弱測定方法を提案すること、(3) 二つの粒子 (AとB) が二つの経路 (aとb) をそれぞれ通る積事象を弱測定する方法を提案すること (ただし重要なことは個別事象を見ないまま、積事象だけを直接見ること)、が必要である。(1)は先行研究として最近実現されている。(2)(3)が本研究のオリジナルである。特に(3)は困難な実験であり全く先例がない。本実験では、「それぞれの測定を行うプローブ物理系を予めエンタングルした状態として準備する」ことにより実現している。

実験の結果はAharonovの予言をそのまま実現するものであった。これにより、「干渉の有り様に抵触せず、干渉計の内部を弱測定の範囲で覗くことが可能」であることおよび「非直交な始状態と終状態で条件付けた弱測定値は異常な値を取り得る」ということが本当であることが確認された。このことは、量子力学の範囲内であっても、従来常識と思われていたことが皮相的なものであったことを示す実証であり、その価値は大きい。よって本論文を博士 (理学) の学位論文として価値のあるものと認めるものである。