

偏光状態における非可換物理量の連続測定

高エネルギー物理学研究室 M106281 鈴木佑太郎

指導教員 飯沼昌隆 副指導教員 ホフマンホルガ

1 はじめに

自然現象を記述するにあたり、量子力学は状態と演算子を用いて確率を扱う理論であるという点で他の物理学と決定的に異なっている。どんな物理学の理論も実験結果との整合性が取れている必要がある。従来、量子論は測定で得られる値を固有状態における固有値に対応させて、期待値として扱うことが多かった。一方で量子力学では、演算子の交換関係が重要な役割を果たす。二つの非可換な物理量は、同時に決定できない。これは測定によって量子状態が壊されることに起因すると考えられ、一つの物理量のみを測定する場合、顕に問題にならない。この同時に測定できない性質故に、量子力学には不確定性が基礎的に存在するのではないかと、多くの論争が為されてきた。

しかし、量子論は連続測定を禁止してはならず、測定結果を結合確率の形で予想することができる。さらに近年、中間状態の測定の強さを制御した測定が実現できるようになり、これまで実験的に困難であった同時に決定できない二つの固有値の性質を、結合確率によって統計的に扱うことが可能になった。その最たるものに、測定の強さを小さくして行う弱測定が挙げられる。本研究は、広義には2準位系である光子の偏光状態に着目し、非可換な物理量の連続測定を行ったものである。中間状態の測定の強さを任意に選ぶことができるため、測定の分解能と反作用として特徴付けられる中間測定の不確定関係を評価することができる。さらに、それらを考慮した結合確率を求めることができる。測定の不確定関係が実験で直接得られる結合確率に統計的に及ぼす影響を考慮することで、量子系本来の結合確率の性質と結合確率を得るときの測定の不確定関係の役割について研究した。

2 連続測定と測定による不確定関係

図1は本研究で対象にした光子の偏光状態の連続測定を表す概念図である。中間状態の測定としてPM偏光の差 $\langle \hat{S}_{PM} \rangle$ 、終状態の測定としてHV偏光の差 $\langle \hat{S}_{HV} \rangle$ を測定する。P偏光(M偏光)と

は直線 45° (135°) 偏光を、H偏光(V偏光)は直線水平(垂直)偏光を表している。始状態は任意の直線偏光を用意し、選んだ偏光状態を固有状態とみなす。それぞれの固有値は $s_i = +1$ 、 s_{PM} 、 s_{HV} は ± 1 であり、最終的に結合確率 $P(s_{PM}, s_{HV})$ を得る。中間状態の測定は測定の強さを変えて行う。これらを図1で示した干渉計によって実現している。始状態は直線偏光を準備して干渉計の前にある半波長板(HWP)を回転させることによって準備する。中間測定は干渉計内のHWPをP偏光の方向へそれぞれ θ 回転させることによって θ に応じた測定の強さの測定が実現できる。すなわち中間測定は測定演算子 \hat{M}_P, \hat{M}_M を用いて、

$$\begin{aligned} \hat{M}_P^\dagger \hat{M}_P &= \frac{1}{2} (\hat{I} + \sin 4\theta \hat{S}_{PM}) \\ \hat{M}_M^\dagger \hat{M}_M &= \frac{1}{2} (\hat{I} - \sin 4\theta \hat{S}_{PM}) \end{aligned} \quad (1)$$

と書ける。終状態測定は干渉計から出力された光子が偏光板を通過することによって実現される。偏光板はH偏光、あるいはV偏光のみを通過するように設置する。

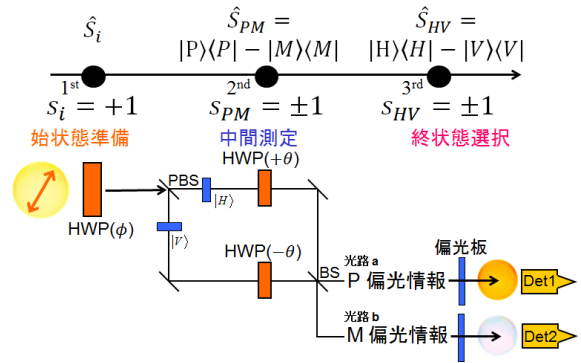


図1 測定基底とそれを実現するセットアップ

得られた結合確率から、中間測定による測定の分解能 ε と測定の反作用 η が得られる。それらを以下のように定義する。

$$\varepsilon \equiv \frac{\sum_{s_{PM}, s_{HV}} s_{PM} P(s_{PM}, s_{HV})}{\langle i | \hat{S}_{PM} | i \rangle} \quad (2)$$

$$1 - \eta \equiv \frac{\sum_{s_{PM}, s_{HV}} s_{HV} P(s_{PM}, s_{HV})}{\langle i | \hat{S}_{HV} | i \rangle} \quad (3)$$

中間測定の分解能を大きくすると、それに応じて測定の反作用も大きくなり終状態測定の情報が得られなくなる。これらの不確定 (相補的) 関係は一般に

$$\varepsilon^2 + (1 - \eta)^2 \leq 1 \quad (4)$$

と書け、どのような測定に対しても成立するとされている。実際に我々のセットアップで得られた結合確率から ε, η を評価した。図 2 は測定の強さを 0 から 1 まで変えたときの結合確率から求めた ε, η である。式 (4) で関係付けられる ε, η について具体的な値を知っていることが重要となる。実験の不完全性がないときは、 $\varepsilon = \sin 4\theta, 1 - \eta = \cos 4\theta$ と表せられ、式 (4) の極限と一致する。

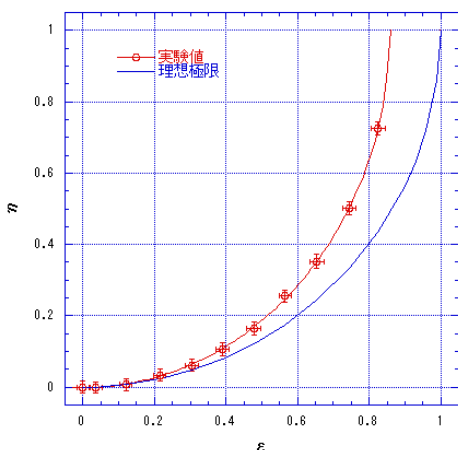


図 2 測定の分解能と測定の反作用

測定の強さの小さい領域では、測定の反作用はほとんど変化せず測定の分解能のみによって結合確率は変化すると考えることが可能である。この測定の反作用の寄与を無視できる領域において、結合確率から物理量の期待値を求める測定が弱測定である。この弱測定における期待値は弱値と呼ばれ、始状態と終状態が直交に近づくほど増大することが知られている。この弱値と測定の反作用との関係について解析し、増大の上限が測定の反作用によって制限されることを示した。紙面の都合により詳細は割愛する。

3 測定に依存しない結合確率

実際に得られた結合確率は、中間測定の強さに影響される。例えば、 $P(-1, +1)$ は

$$4P(-1, +1) = 1 + (1 - \eta)\langle \hat{S}_{HV} \rangle - \varepsilon\langle \hat{S}_{PM} \rangle \quad (5)$$

と記述できる。我々は測定に依らない量子系本来の結合確率を評価したい。それは二つの非可換物理量の相関を結合確率の形で評価することであり、量子相関を確認することである。今我々は、定量的に ε, η という測定の不確定関係を知っている。そこで中間測定による統計的な影響をスピン反転による結合確率の混合だとみなすことによって、測定を行わなかったときの元々の結合確率を再構成する方法を考案した。図 3 は $P(-1, +1)$ について得られた結合確率と再構成した結合確率を比較したものである。 ε, η はそれぞれ独立に考慮したものを P_η, P_ε 、両方考慮したものを P_0 とした。量子論により $P_0(-1, +1)$ は

$$4P_0(-1, +1) = 1 + \langle \hat{S}_{HV} \rangle - \langle \hat{S}_{PM} \rangle \quad (6)$$

と予想され、初期状態にのみ依っていることがわかる。再構成した結合確率は測定の強さに依らず、予想値と一致し負の値を示した。この方法によって量子系本来の結合確率が求められることが示された。加えて、測定の不確定関係の影響によって、結合確率は正に制限されることもわかった。

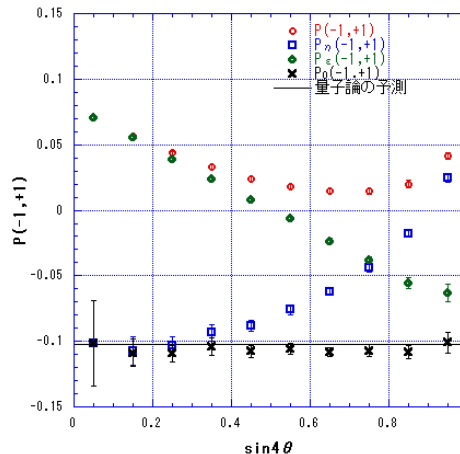


図 3 得られた結合確率と再構成した結合確率

4 まとめ

光子の偏光状態について $\hat{S}_{PM}, \hat{S}_{HV}$ の連続測定から結合確率の評価を行った。始状態終状態を選び、中間状態の測定の強さを変えて結合確率の測定を行うことで測定の不確定関係の解析を行った。測定の不確定関係を考慮することで、測定の強さに依らない量子系本来の結合確率を得ることができ、これは負の値もとり得ることを示した。