

Streszczenie

Rozprawa doktorska (tytuł ang.)

Precision bounds in noisy quantum metrology

Autor: Jan Kołodzyński

Kwantowa metrologia jest nowatorską dziedziną, będąca przedmiotem dzisiejszych badań zarówno w fizyce teoretycznej jak i doświadczalnej. Jej głównym celem jest analiza i wykorzystanie układów kwantowych, które użyte do wyznaczania wielkości fizycznych pozwalają osiągać precyzję pomiarów poza zasięgiem tradycyjnych metod ograniczonych przez prawa klasycznej fizyki. Zakładając, że jesteśmy w stanie idealnie kontrolować badany układ kwantowy, efekty takie jak *splątanie kwantowe* czy *super-klasyczne korelacje* pozwalają teoretycznie na pomiar parametrów ze średnim błędem kwadratowym, który skaluje jak $1/N^2$ z liczbą zawartych cząstek, a nie jak w przypadku klasycznej statystyki: $1/N$. Z drugiej strony rodzi się naturalne pytanie już na poziomie teoretycznym, na ile takie spektakularne kwantowe wzmocnienie precyzji może odgrywać ważną rolę w rzeczywistych eksperymentach, w których nieodzowne jest uwzględnienie zjawiska *dekoherencji*, czyli szumów zaburzających badany układ i wprowadzających błędy do wyników pomiarowych.

W poniższej rozprawie doktorskiej rozwiewamy wątpliwości w jednej z kluczowych kwestii, proponując ogólne metody na oszacowanie osiągalnej precyzji w protokołach metrologii kwantowej z uwzględnionym dowolnym nieskorelowanym szumem, który niezależnie zaburza każdą z cząstek (atomów, fotonów) zawartych w układzie. W szczególności, pokazujemy, że geometryczne własności *kanalu kwantowego* opisującego ewolucję pojedynczej cząstki są wtedy wystarczające do wyznaczenia krytycznych ograniczeń na maksymalne wzmocnienie kwantowe. Nasze wyniki wykazują, że nawet nieskończenie mały szum wymusza by precyzja estymacji skalowała się klasycznie w asymptotycznej granicy wielu cząstek, co równoważne jest ze stwierdzeniem, że maksymalne dopuszczalne wzmocnienie kwantowe może co najwyżej zwiększać dokładność pomiarową o stały czynnik. Pokazujemy, że choć dla małej liczby cząstek efekty dekoherencji są zaniedbywalne, to w granicy dużych N forma optymalnych stanów kwantowych, w których należałoby przygotować dany układ kwantowy, jak i ich pomiarów zmienia się diametralnie pod wpływem występujących szumów. Z drugiej strony, wyznaczone przez nas ograniczenia na maksymalną precyzję są wtedy typowo osiągalne poprzez użycie technik naturalnych dla dzisiejszych eksperymentów.

Ponieważ dokładnie wprowadzamy i opisujemy zagadnienia i narzędzia matematyczne niezbędne do badań aktualnych problemów w metrologii kwantowej, mamy nadzieję, że poniższa rozprawa może stać się przydatna dla naukowców, którzy zajmują się na co dzień kwantową teorią informacji, ale chcieliby dokładniej zapoznać się z metrologią kwantową od strony teoretycznej. W tym celu szczegółowo przedstawiamy zarówno podejście *częstotliwościowe* jak i *Bayesowskie* do wnioskowania statystycznego, które znane są w klasycznej teorii estymacji i dla naszych celów muszą być uogólnione do reżimu kwantowego. W pracy staramy się także uwzględniać przykłady, które obrazują wykorzystanie wprowadzanych przez nas technik metrologicznych; w szczególności, przedstawiamy w różnych konfiguracjach standardowe modele szumów w układach, których cząstki mogą być reprezentowane przez *qubity*. Co więcej, dokładnie analizujemy także problem estymacji fazy w *interferometrze Macha-Zehndera* zarówno od strony klasycznej jak i kwantowej, uwzględniając przy tym model strat fotonów w celu omówienia efektów wywołanych przez dekoherencję.