

# Efekty Skorelowanego Szumu w Metrologii Kwantowej

Rafał Demkowicz-Dobrzański, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

## Streszczenie popularnonaukowe

W ramach fizyki klasycznej nie istnieją fundamentalne ograniczenia na precyzję z jaką możemy mierzyć wielkości fizyczne, a wszelkie niepewności pomiarowe mają charakter techniczny. Co więcej, sam pomiar nie ma żadnego szczególnego statusu w strukturze teorii klasycznej, jako że wszystkie wielkości fizyczne mają dobrze określone wartości przed wykonaniem pomiaru, a jedyną rolą pomiaru jest ich „ujawnienie”.

Mechanika kwantowa, w której sformułowaniu pojęcie pomiaru odgrywa kluczową rolę, daje zupełnie nową perspektywę na pytanie o fundamentalne ograniczenia na precyzję pomiaru wielkości fizycznych. Wyniki pomiaru pojedynczego układu kwantowego, takiego jak atom czy foton, mają charakter probabilistyczny. Korzystając z matematycznych narzędzi teorii estymacji, można określić ilość informacji na temat danego parametru fizycznego, którą potencjalnie można uzyskać w wyniku optymalnego pomiaru układu kwantowego.

Dobłą ilustracją jest pomiar odległości przy wykorzystaniu interferometrii optycznej. Odległość między lustrami interferometru wpływa na stan i zachowanie się światła w interferometrze. Światło, zgodnie z fizyką kwantową, składa się z fotonów. Znajomość stanu i zachowania się fotonów w interferometrze pozwala określić prawdopodobieństwa, że foton zostanie zarejestrowany w danym detektorze, a stąd można określić maksymalną informację jaką dzięki obserwacji fotonów można uzyskać na temat odległości pomiędzy lustrami interferometru.

Metrologia kwantowa jest dziedziną fizyki zajmującą się badaniem metrologicznego potencjału układów kwantowych i proponowanie protokołów, które optymalnie wykorzystają ten potencjał w praktyce. Najbardziej spektakularnym zastosowaniem metrologii kwantowej są współczesne detektory fal grawitacyjnych, które są de facto gigantycznymi optycznymi interferometrami Michelsona, będącymi w stanie mierzyć ekstremalnie małe oscylacyjne ruchy zwierciadeł (spowodowane np. przez przechodzącą falę grawitacyjną) o amplitudzie mniejszej niż rozmiary jądra atomowego. Jeszcze bardziej zaskakujący jest fakt, że w ostatnich latach czułość tych urządzeń udało się dodatkowo poprawić, używając tzw. ściśniętych stanów światła, gdzie kluczową rolę odgrywa splątanie pomiędzy fotonami.

Głównym wyzwaniem dla teoretycznych badań w ramach metrologii kwantowej jest zrozumienie potencjału metrologicznego stanów kwantowych atomów i światła w realistycznych warunkach uwzględniających obecność szumu. Szum prowadzi do dekoherencji stanów kwantowych i w ogólności zmniejsza czułość pomiarową kwantowych protokołów metrologicznych.

Większość dotychczasowych badań w tej dziedzinie prowadzonych było w ramach modeli z *nieskorelowanym* szumem, gdzie szum działający na różne cząstki lub w różnych chwilach czasu jest niezależny od siebie. To podejście jest uzasadnione w pewnych sytuacjach fizycznych, np. optycznej interferometrii w obecności strat, ale nie jest zadawalające w wielu innych istotnych problemach takich jak: stabilizacja zegarów atomowych, pomiary pól magnetycznych, interferometria atomowa, obrazowanie optyczne z fluktuującymi źródłami i wiele innych.

Celem tego projektu jest wyprowadzenie fundamentalnych ograniczeń na precyzję w metrologicznych modelach w obecności skorelowanego szumu i zaproponowanie optymalnych protokołów zbliżających się do tych ograniczeń. Wyniki projektu będą stanowić wskazówkę dla dalszego rozwoju całej dziedziny, pozwalając wybrać najbardziej obiecujące kierunki badań, gdzie potencjał protokołów metrologii kwantowej może być najlepiej wykorzystany w praktycznych urządzeniach pomiarowych.