

Abstrakt

Mechanika kwantowa nadal podważa nasze intuicyjne wyobrażenia o rzeczywistości i informacji, oferując jednocześnie potężne nowe narzędzia komunikacji i bezpieczeństwa. Niniejsza praca bada wzajemne oddziaływanie fundamentalnych zasad kwantowych i ich konsekwencji operacyjnych, łącząc trzy powiązane ze sobą wątki: kryptografię niezależną od urządzenia, interferometrię półniezależną od urządzenia oraz naturę komplementarności falowo-cząsteczkowej.

Zaczynamy od zbadania zasady przyczynowości informacji. Pierwotnie zaproponowana w celu uchwycenia ograniczeń nielokalności kwantowej bez polegania na pełnym formalizmie teorii kwantowej, przyczynowość informacji zapewnia głęboki wgląd w bezpieczeństwo komunikacji kwantowej. Pokazujemy, że wieloczęściowe sformułowanie tej zasady w naturalny sposób prowadzi do silnych relacji monogamicznych w przypadku naruszenia nierówności Bella. Relacje te gwarantują bezpieczeństwo niezależnej od urządzeń kwantowej dystrybucji kluczy przed indywidualnymi atakami, nawet ze strony potencjalnego podsłuchującego w erze postkwantowej. Natomiast prostsze sformułowanie dwuczęściowe nie zapewnia takich gwarancji, co podkreśla istotną rolę korelacji wieloczęściowych.

Opierając się na tym, badamy dualizm falowo-cząsteczkowy w ramach modelu półniezależnego od urządzenia. Łącząc uzupełniające się wielkości interferometryczne, a mianowicie widoczność i rozróżnialność wejściową, z miarami entropii o bezpośrednim znaczeniu operacyjnym, opracowujemy metodę certyfikacji zachowań kwantowych i bezpieczeństwa na podstawie obserwowalnych wzorów interferencyjnych. Stosując warunki symetrii i badając interferometrię z możliwością strojenia, identyfikujemy scenariusze, w których naruszane są granice klasyczne i można ustanowić bezpieczną komunikację. Te teoretyczne spostrzeżenia są potwierdzone przez eksperyment potwierdzający zasadę działania z wykorzystaniem fotonów zakodowanych orbitalnym momentem pędu, a ulepszona granica bezpieczeństwa rozszerza obszar parametrów dla niezawodnej certyfikacji półniezależnej od urządzenia.

Na koniec zwracamy się ku podstawom realizmu kwantowego poprzez eksperymenty z opóźnionym wyborem. Modyfikując strukturę przyczynową i wprowadzając kontrolę wspomaganą splątaniem, śledzimy, w jaki sposób właściwości fal i cząstek pojawiają się w interferometrze. Wykorzystując kwantifikator realizmu kontekstowego, pokazujemy, że przypisanie właściwości fal lub cząstek zależy w sposób wrażliwy od porządku przyczynowego i dostępnych informacji, nawet jeśli ostateczna widoczność interferencji pozostaje niezmienną.

Wszystkie te badania rzucają światło na głębokie powiązania między korelacjami kwantowymi, ograniczeniami operacyjnymi i naturą rzeczywistości. Pokazują one, w jaki sposób zasady takie jak przyczynowość informacyjna i bezpieczeństwo niezależne od urządzeń są zakorzenione w fundamentalnych cechach mechaniki kwantowej oraz w jaki sposób struktury przyczynowo-kontekstowe kształtują wyrażenie komplementarności falowo-cząsteczkowej. Praca ta łączy teorię z eksperymentem, oferując bogatsze zrozumienie zarówno operacyjnych, jak i

konceptyjnych aspektów świata kwantowego.