

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Moniki E. Mycroft pt. *Protocols for selected quantum technologies based on feasible multi-photon bipartite entanglement***

Współczesne technologie kwantowe dotarły w swoim rozwoju do chwili, gdy coraz liczniejsze, czysto teoretyczne pomysły na zastosowanie nieklasycznych cech układów kantowo-mechanicznych do przetwarzania przesyłania i przechowywania informacji oraz pomiaru doczekały się realizacji doświadczalnych. Realizacji raczej niedoskonałych ponieważ, niestety, Natura, jak to ma w swoim zwyczaju, stawia szereg ograniczeń najśmielszym pomysłom naukowym. Urządzenia kwantowe, które jesteśmy w tej chwili wykonać z trudem potrafiały sprostać wymaganiom stawianym przez pomysły teoretyczne. Dwie drogi rozwiązania tego problemu narzucają się w oczywisty sposób. Musimy pracować nad ulepszaniem tego co mamy do dyspozycji po stronie doświadczalnej lub konstruować rozwiązania teoretyczne dostosowane do tego co posiadamy. Bez wątpienia, połączenie tych dwóch dróg prowadzić będzie do najlepszych rozwiązań.

Elementarnymi nośnikami informacji kwantowych są qubity, a jednym z najważniejszych zasobów kwantowo-informatycznych jest splątanie kwantowe, tzn. nieklasyczne korelacje między układami fizycznymi (np. fizycznymi realizacjami qubitów). Aby użytecznie wykorzystać informację na poziomie kwantowym potrzebujemy więc urządzeń produkujących splątane qubity oraz odpowiednich detektorów pozwalających na odczytanie przetworzonej, czy też przesłanej informacji.

Pomysły na praktyczną konstrukcję urządzeń przetwarzających i przesyłających informacje kwantową oraz wykorzystujących własności kwantowe w pomiarach wykorzystują kilka różnych platform fizycznych. Jedną z najbardziej interesujących jest platforma optyczna. Nośnikiem informacji są tu fotony, lub dokładniej, ich różne stopnie swobody, a operacje wymagane do przeprowadzania obliczeń kwantowych, kwantowego szyfrowania i przesyłania informacji wykonywane są za pomocą odpowiednich, prostych z zasady, urządzeń optycznych takich jak płytki światłodzielące i lustra, interferometry, czy też nieco bardziej skomplikowane, bo nieliniowe. Dla uzyskania zamierzonych celów informatycznych lub pomiarowych musimy więc dysponować odpowiednimi źródłami splątanych fotonów i ich wydajnymi detektorami. Dwa, wspomniane powyżej podejścia do usprawnienia implementacji kwantowo informatycznych polegają tu na zwiększeniu odporności tych urządzeń na zewnętrzne zaburzenia i szумы oraz konstrukcji protokołów, które mogą być skutecznie stosowane nawet wtedy, gdy hardware nie jest doskonały.

Temu drugiemu podejściu poświęcona jest rozprawa pani Moniki E. Mycroft *Protocols for selected quantum technologies based on feasible multi-photon bipartite entanglement*, w której przedstawiła oryginalne rozwiązania dla protokołów produkcji splątania i detekcji w pomiarach fazy optycznej.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, z których pierwszy jest krótkim wstępem zawierającym zwięzły opis podstawowych obszarów, w których technologie kwantowe znajdują zastosowania tj. przetwarzanie informacji, kryptografia kwantowa, kwantowa metrologia oraz obliczenia kwantowe. Jako główne cele rozprawy autorka wskazuje opisanie

nowych pomysłów na wydajne wytwarzanie splątania oraz kwantowo wzmacnianą metrologię metodami interferometrycznymi.

Drugi rozdział poświęcony jest opisowi dostępnych technik dotyczących źródeł optycznych i detektorów. Autorka zaczyna od tych drugich. Określa ich ważne cechy, wydajność, czas resetowania, liczbę ciemnych zliczeń, zdolność rozdzielczą ze względu na liczbę fotonów i fluktuacje między prawdziwym czasem przybycia a jego rejestracją (jitter czasowy). W kolejnych podrozdziałach opisuje trzy praktyczne realizacje, fotodiody lawinowe, nadprzewodnikowe nanodetektory oraz mikrobolometry. Opisy są krótkie, ale dają dobre obrazy podstawowych zjawisk fizycznych wykorzystywanych w tych urządzeniach. Po nich następują szczegółowe sprawozdania z ich możliwości w zakresie wyżej wymienionych cech, uzupełnione o komentarze dotyczące ich zalet i wad oraz porównania. Część poświęcona źródłom fotonów koncentruje się na procesie parametrycznego podziału częstości jako źródle skorelowanych par fotonów. Autorka podaje szczegółowy opis procesu i jego rezultatów oraz, co ważne dla oryginalnej części rozprawy, wskazuje go jako źródło wielofotonowych stanów splątanych. W podsumowaniu Rozdział 2 rozprawy zawiera bardzo dobry opis dostępnych technik eksperymentalnych ważnych dla rozprawy.

Rozdział 3. opisuje metody matematyczne stosowane w rozprawie. Omówiono w nim istotne cechy funkcji hipergeometrycznej, niektóre jej wielomianowe wcielenia (w szczególności wielomiany Krawczuka) oraz szczególne przypadki (funkcje Krawczuka). Autorka prezentuje istotne związki matematyczne oraz, co ważne, pokazuje rolę omawianych funkcji w opisie niektórych zjawisk kwantowo-optycznych, rozszczepienia wiązki oraz dwu- i wielofotonowej interferencji Hong-Ou-Mandela. Dwa ostatnie podrozdziały poświęcone są matematycznemu modelowaniu strat fotonów w beam-splitterach i interferometrze Macha-Zehndera. Matematyka rozdziału trzeciego jest koncepcyjnie prosta, ale w żmudna. Autorka wykazała się tu dobrą znajomością i umiejętnością korzystania z funkcji specjalnych.

Rozdziały 4. i 5. stanowią trzon rozprawy. Przedstawiają one, odpowiednio, oryginalne rozwiązania dotyczące protokołów dystrybucji splątania oraz interferometrii wzmocnionej kwantowo.

Rozdział 4. rozpoczyna się od przeglądu technologii komunikacji kwantowej ze splątanymi dwufotonowymi stanami Bella, które są wykorzystywane w obecnych implementacjach oraz omówienia ich wad, w szczególności wysokich współczynników strat na dużych odległościach. Oryginalnym pomysłem na usprawnienie jest zastosowanie splątania wielofotonowego i pokazanie jego przewagi nad technologiami jednofotonowymi. Koncepcja brzmi prosto, ale wymaga pomysłowej implementacji przedstawionej szczegółowo w rozdziale 4. Polega ona na generowaniu splątanych w liczbie fotonów dwumodowych stanów ściśniętej próżni poprzez spontaniczną parametryczną podział częstości, a następnie sekwencję procesów interferencyjnych, pomiarowych i transmisyjnych w układzie trójstronnym, w wyniku których powstają splątane (w ogólności, z powodu strat, mieszane) stany wielofotonowe, które mogą być wykorzystane w komunikacji kwantowej. Szczegółowe obliczenia dają ilość splątania, które można wytworzyć i pokazują, że jest ona bliska wartości teoretycznie maksymalnej. Najważniejszym wynikiem jest to, że protokół jest nadspodziewanie odporny na straty, tzn. splątanie stanów końcowych pozostaje wysokie w obecności bardzo dużych strat w kanałach

transmisyjnych. Wydajność protokołu kwadratowo przewyższa wydajność powszechnie stosowanych par pojedynczych fotonów o splątanych polaryzacjach. Opisane zalety mają ogromne znaczenie dla długodystansowej komunikacji kwantowej i kryptografii kwantowej.

W rozdziale 5. autorka przedstawia zastosowania proponowanego protokołu dystrybucji splątania do innego problemu. Celem jest wytworzenie optymalnych stanów do kwantowej estymacji fazy optycznej. Przedstawione rozwiązanie przewyższa pod pewnymi względami standardowe tzw. stany Hollanda-Burnetta i N00N i znalazło już realizację eksperymentalną. Pani Mycroft prezentuje tu ogólny zarys zagadnień koncepcyjnych kwantowej interferometrii oraz aparat matematyczny przydatny do analizy rozważanych problemów i rozwiązań. Podaje szczegółowy opis proponowanego rozwiązania (tj. wytwarzania stanów optymalnych) oraz analizę jego zalet.

Przedstawione w rozprawie oryginalne rozwiązania mają dużą wartość dla współczesnych technologii kwantowych. Są nowe, przyszłościowe - niewątpliwie mogą mieć niemały wpływ na techniki komunikacji i metrologii kwantowej. Praca przedstawia je w sposób systematyczny i bardzo przejrzysty. Jej konstrukcja jest logiczna i łatwa do prześledzenia. Nie mam żadnych wartych wspomnienia uwag krytycznych.

W podsumowaniu uważam, że rozprawa doktorska Pani Moniki Mycroft *Protocols for selected quantum technologies based on feasible multi-photon bipartite entanglement* jest bardzo interesująca i dobrze napisana. Zawiera nowe oryginalne wyniki ważne dla komunikacji kwantowej i kwantowej metrologii. W mojej ocenie spełnia wszystkie warunki, zarówno formalne jak i zwyczajowe, wymagane od prac doktorskich i stawiam wniosek o dopuszczenie jej autorki do kolejnych etapów postępowania doktorskiego.



prof. dr hab. Marek Kuś

Warszawa 15.01.2023