



Z55 – Splątanie kwantowe par fotonów

II Pracownia Fizyczna

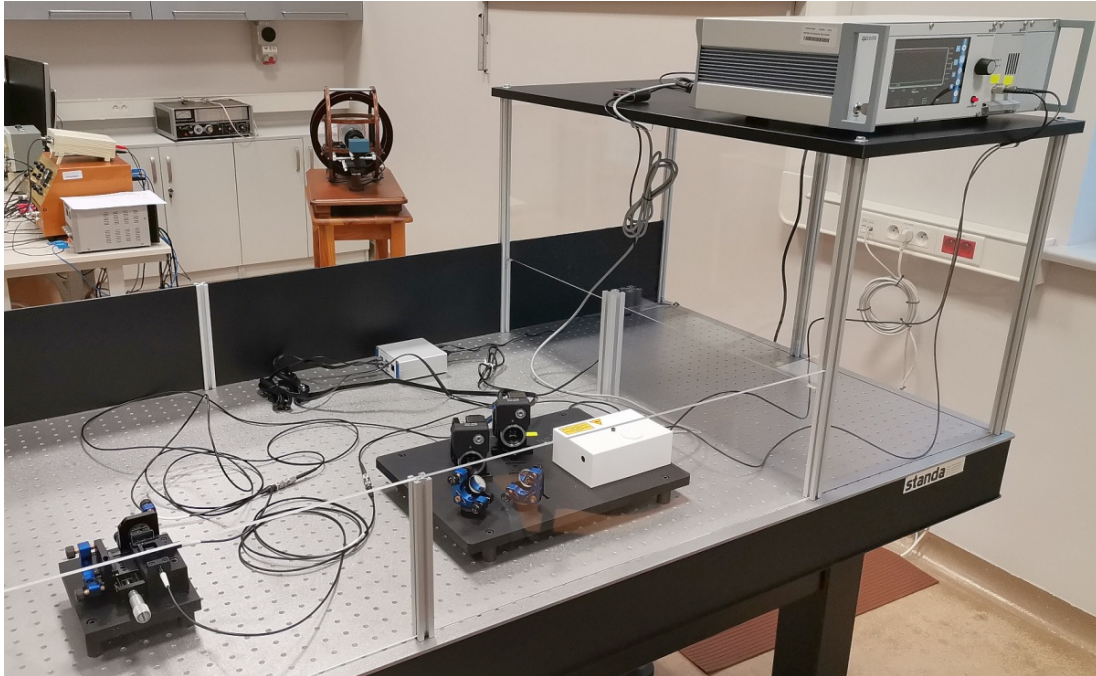
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Jagielloński

Splątanie jest zjawiskiem, w którym dwie cząstki są połączone jakąś cechą. Cząstka taka jak elektron może zostać splątana przez jej spin. Fotony mogą być splątane poprzez ich polaryzacje. Celem tego ćwiczenia jest generowanie i wykrywanie splątania par fotonów. Wiązka światła z niebieskiego (405 nm) lasera pada na układ dwóch kryształów BBO i w procesie spontanicznej parametrycznej konwersji w dół, z niewielką wydajnością (poniżej 10^{-5}) generuje pary splątanych fotonów z zakresu bliskiej podczerwieni (810 nm). Niska wydajność konwersji umożliwia rozdzielenie czasowe zliczeń fotonów przez ich detekcję za pomocą fotodiod lawinowych i sprawdzenie czy detekcja pary fotonów nastąpiła w koincydencji. Polaryzację fotonów bada się zmieniając kąt ustawienia analizatorów na ich drodze do detektorów. Analiza zliczeń par fotonów przy różnych kombinacjach badanych polaryzacji pozwala wykazać ich splątanie poprzez wyznaczenie wartości parametru S w nierówności Clausera-Horne'a-Shimony-Holta. Zestaw eksperymentalny umożliwia otrzymanie wartości S około 2,4 – 2,5 (a więc znacząco większej od 2), a zatem z naruszeniem mechaniki klasycznej! (Nierówność CHSH oznacza, że S jest nie większe niż 2 dla systemu zgodnego z fizyką klasyczną.) Modyfikacja układu doświadczalnego pozwala kierować jeden z fotonów pary do interferometru Michelsona, podczas gdy drugi foton z pary wyzwala zliczenie. Badanie zliczeń fotonów zarejestrowanych na wyjściu interferometru w zależności od różnicy dróg optycznych prowadzi do interferogramu, który powstaje w warunkach, gdy w interferometrze znajdował się co najwyżej pojedynczy foton!

Cel ćwiczenia

Zestaw doświadczalny Z55 umożliwia wykonanie eksperymentów z zakresu optyki kwantowej. Urządzenie „*Entanglement Demonstrator*” (rys. 1), wyprodukowane przez firmę *qutools*, wytwarza pary splątanych fotonów, które kierowane są poprzez analizatory polaryzacji do czułych detektorów światła – fotodiod lawinowych. Układ elektroniczny pozwala zliczać zarejestrowane fotony i dodatkowo zliczać te pary fotonów, które dotarły do obu detektorów w wybranym przedziale czasu (w koincydencji czasowej zliczane są pary splątanych fotonów). Stany splątane generowanych par fotonów bada się obliczając tzw. nierówność Bella, na przykład typu CHSH (skrót pochodzi od nazwisk autorów tego testu: **Clauser, Horne, Shimony, Holt**). Dodatkowym wyposażeniem zestawu eksperymentalnego jest interferometr Michelsona, do którego trafia jeden foton z każdej wytworzonej pary. Drugi foton z pary trafia bezpośrednio do detektora światła i służy do wyzwolenia zliczeń. Pary fotonów powstają w takich odstępach czasowych, że w interferometrze przebywa co najwyżej pojedynczy foton. Zmiana drogi optycznej jednego z ramion interferometru Michelsona pozwala na zarejestrowanie zmian zliczeń, które pokazane w funkcji różnicy dróg optycznych pomiędzy ramionami tworzą charakterystyczny interferogram. Maksymalne i minimalne zliczenia pojawiają się przy różnicy dróg optycznych powiązanych z długością fali

generowanych w kryształach BBO fotonów (810 nm). Największe zmiany zliczeń (amplituda maksimum i minimum interferogramu) rejestrowane są przy zerowej różnicy dróg optycznych i bardzo szybko maleją ze wzrostem tej różnicy dróg. Analiza obwiedni interferogramu pozwala wyciągnąć wnioski o drodze spójności interferujących fotonów.



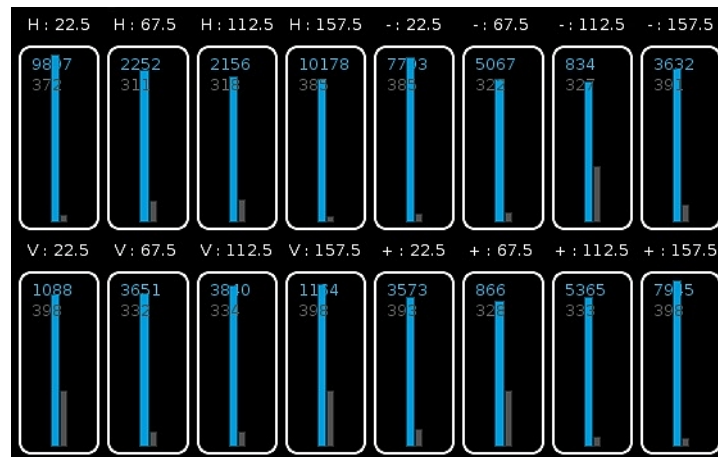
Rys. 1. Zestaw „Entanglement Demonstrator” używany w ćwiczeniu Z55.

Zagadnienia do przestudiowania:

1. dualizm korpuskularno – falowy;
2. własności światła: długość fali, polaryzacja, droga i czas spójności, energia fotonu;
3. emisja światła w laserze diodowym;
4. elementy optyczne formujące polaryzację światła (płytki półfalowa i obracanie kierunku polaryzacji wiązki światła, polaryzujący dzielnik wiązki);
5. kryształ BBO, proces spontanicznej parametrycznej konwersji w dół;
6. optyka światłowodowa, światłowód jednomodowy, metody łączenia światłowodów, wprowadzanie światła do włókna światłowodowego (kolimator);
7. detektor pojedynczych fotonów – fotodioda lawinowa;
8. paradoks EPR (eksperyment myślowy zaproponowany przez Alberta Einsteina, Borysa Podolskiego i Nathana Rosena);
9. nierówność Bella (twierdzenie, które udowodnił John Stewart Bell);
10. nierówność SHSH (Clausera-Horne'a-Shimony-Holta);
11. interferometr Michelsona;
12. prędkość światła w ośrodku materialnym (opóźnienie jakie powstaje po przejściu światła / fotonu przez szklaną płytkę);
13. podłączanie zdalnego ekranu w protokole VPN (gdyż jest możliwość zdalnej pracy, w tym sterowania elementami mechanicznymi i zbierania danych z komputera sterującego zestawem „Entanglement Demonstrator”).

Zadanie obliczeniowe

Rys. 2 przedstawia wynik eksperymentu, w którym pary splątanych fotonów przechodziły przez liniowe polaryzatory ustawione pod odpowiednio wybieranymi kątami. Dla każdego ustawienia polaryzatorów, przez czas 1000 ms zliczano tylko te rejestracje, które występowały w koincydencji czasowej, a więc pochodziły od par splątanych fotonów wygenerowanych w kryształach BBO (niebieskie słupki wraz z danymi liczbowymi).



Rys. 2. Zliczenia (każde w czasie 1 s) par splątanych fotonów; eksperyment CHSH.

Nad słupkami znajdują się informacje o wybranych kątach, pod którymi ustawione są polaryzatory; np. „H:22,5” oznacza ustawienie pierwszego polaryzatora w pozycji poziomej (*horizontal*), a drugiego polaryzatora pod kątem 22,5°. Pierwszy polaryzator ustawiany był podczas eksperymentu również w innych pozycjach oznaczonych następującymi symbolami: „-” (czyli pod kątem -45°), „+” (pod kątem $+45^\circ$) oraz „V” (w pozycji pionowej – *vertical*).

$$\begin{array}{l}
 \frac{\begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array}}{\begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array}} = \boxed{} = \boxed{} \\
 \phantom{\frac{\dots}{\dots}} + - \\
 \frac{\begin{array}{c} \text{-45}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{-45}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array}}{\begin{array}{c} \text{-45}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{-45}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{22.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{112.5}^\circ \end{array}} = \boxed{} = \boxed{} \\
 \phantom{\frac{\dots}{\dots}} - - \\
 \frac{\begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array}}{\begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{0}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{90}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array}} = \boxed{} = \boxed{} \\
 \phantom{\frac{\dots}{\dots}} + - \\
 \frac{\begin{array}{c} \text{45}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{45}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array} - \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array}}{\begin{array}{c} \text{45}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{45}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{67.5}^\circ \end{array} + \begin{array}{c} \text{135}^\circ \\ \text{157.5}^\circ \end{array}} = \boxed{} = \boxed{}
 \end{array}$$

Rys. 3. Tabela ułatwiająca obliczenie wartości parametru S w nierówności Clausera-Horne'a-Shimony-Holta (*quED Work Sheet – Bell's Inequality*; dostępna w qutools.com/qued/).

Tabela przedstawiona na rys. 3 (tabela ta stanowi fragment arkusza *quED Work Sheet – Bell's Inequality*; przygotowanego przez producenta urządzenia i udostępniona na stronie internetowej qutools.com/qued/) ułatwi obliczenie wartości parametru S w nierówności Clausera-Horne'a-Shimony-Holta [4, 5, 7]. W pierwszym kroku należy obliczyć (zob. dane liczbowe z rys. 2 w załączniku) znormalizowane wartości oczekiwane zliczeń:

$$E(\alpha, \beta) = \frac{C(\alpha, \beta) - C(\alpha, \beta_{\perp}) - C(\alpha_{\perp}, \beta) + C(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})}{C(\alpha, \beta) + C(\alpha, \beta_{\perp}) + C(\alpha_{\perp}, \beta) + C(\alpha_{\perp}, \beta_{\perp})}$$

gdzie $C(\alpha, \beta)$ oznacza zliczenie otrzymane dla kombinacji kątów α i β ustawienia polaryzatorów [7, paragraf *A3 – Bell Experiment*], natomiast α_{\perp} i β_{\perp} oznaczają ustawienie odpowiedniego polaryzatora ortogonalnie do kątów α i β .

Główną ideą nierówności CHSH-Bella jest to, że w lokalnych realistycznych teoriach wartość bezwzględna określonej kombinacji korelacji między dwiema cząstkami jest ograniczona przez 2. W drugim kroku należy więc sprawdzić, jaką wartość S otrzymano w eksperymencie z rys. 2.

$$S(\alpha, \alpha', \beta, \beta') = E(\alpha, \beta) + E(\alpha', \beta) - E(\alpha, \beta') + E(\alpha', \beta')$$

gdzie $\alpha(\alpha')$ i $\beta(\beta')$ oznaczają lokalne ustawienia pomiarowe dwóch obserwatorów, z których każdy odbiera jedną z cząstek. W naszej szczególnej konfiguracji eksperymentalnej ze splątanymi fotonami $\alpha(\alpha')$ i $\beta(\beta')$ oznaczają orientacje filtrów polaryzacyjnych umieszczonych przed kolimatorami zbierającymi fotony, by umożliwić ich przesłanie za pomocą jednomodowych światłowodów do fotodiod lądowych. Proszę przedyskutować otrzymany wynik! Jaka jest górna granica naruszenia nierówności SHSH?

Do wyznaczenia odchylenia standardowego wartości eksperymentalnej S proszę zastosować wzór

$$\Delta S(\alpha, \alpha', \beta, \beta') = \sqrt{\sum_{a=\alpha, \alpha'} \sum_{b=\beta, \beta'} \Delta E(a, b)^2}$$

gdzie błędy $\Delta E(a, b)$ poszczególnych współczynników korelacji są obliczane za pomocą propagacji błędów Gaussa:

$$\begin{aligned} \Delta E(a, b) &= \\ &= \frac{[C(a, b) + C(a_{\perp}, b_{\perp})] \cdot [C(a, b_{\perp}) + C(a_{\perp}, b)]}{[C(a, b) + C(a, b_{\perp}) + C(a_{\perp}, b) + C(a_{\perp}, b_{\perp})]^2} \sqrt{\frac{1}{C(a, b) + C(a_{\perp}, b_{\perp})} + \frac{1}{C(a, b_{\perp}) + C(a_{\perp}, b)}} \end{aligned}$$

Jeżeli wartość eksperymentalna S jest liczbowo większa od 2, oznacza to naruszenie nierówności CHSH. Siła naruszenia jest określana jako liczba n_{Δ} odchyłeń standardowych, które składają się na różnicę między wartością eksperymentalną S a lokalną realistyczną granicą 2.

$$n_{\Delta} = \frac{S - 2}{\Delta S}$$

Aparatura i materiały

Zestaw „*Entanglement Demonstrator*” używany w ćwiczeniu Z55 został pokazany na rys. 1. Na stole optycznym tłumiącym wibracje (Standa) zamontowano płytę optyczną z układem wytwarzającym splątane fotony (zamkniętym w białej, prostopadłościennej obudowie), dwa lustra wraz z precyzyjnie regulowanymi uchwytami, dwa elektrycznie obracane polaryzatory i dwa kolimatory z filtrami VIS kierujące fotony 810 nm do jednomodowych światłowodów. Układ optyczny składa się więc z dwóch niezależnych torów optycznych do badania polaryzacji par splątanych fotonów. Układ wytwarzający te fotony (zamknięty w białej obudowie) zbudowany jest z lasera diodowego 405 nm (o maksymalnej mocy 40 mW), optyki formującej wiązkę laserową, płytki falowej, układu dwóch kryształów BBO o wzajemnie ortogonalnie ustawionych osiach i dwóch płytek wykonanych z kwarcu służących kompensacji opóźnień czasowych pomiędzy fotonami w parze. Obudowa układu wytwarzającego pary fotonów wyposażona jest na wyjściu optycznym w filtr odcinający światło niebieskie. Dzięki temu tylko światło podczerwone 810 nm o bardzo małym natężeniu opuszcza wspomniany układ i w pomieszczeniu podczas normalnej pracy nie trzeba używać okularów ochronnych. Są one jednak wymagane podczas regulacji układu optycznego, gdy obudowa lasera jest zdemontowana! Polaryzatory (polaryzujące dzielniki wiązek) zamontowane są na obrotowych uchwytach, których pozycja regulowana jest za pomocą przekładni pasowych napędzanych przez silniki krokowe. Silniki te są sterowane osobnym układem elektronicznym, a pozycje polaryzatorów kontrolowane są także elektronicznie (fotodiody z oświetlaczami badają pozycję ustaloną jako kąt zerowy – poziome względem powierzchni stołu ustawienie polaryzatorów). Układy ustalające położenie polaryzatorów zasilane i kontrolowane są przez niezależny układ elektroniczny (małe pudełko obecne na stole optycznym). Układ ten zasilany jest osobnym zasilaczem (listwa zasilająca na brzegu stołu włącza ten zasilacz do sieci 230 V), natomiast sygnały kontrolne przesyłane są z głównego sterownika eksperymentu (umieszczonego na specjalnej półce nad stołem) kablem USB. Główny sterownik eksperymentu służy do zasilania diody laserowej (stabilizacja temperatury 25°C złącza diody, stabilizacja prądu diody, możliwość regulacji tego prądu do wartości maksymalnej 50 mA), ustawiania polaryzatorów pod odpowiednim kątem, zliczania fotonów w dwóch niezależnych kanałach za pomocą fotodiod lawinowych. Fotony dostarczane są do wejść fotodiod lawinowych jednomodowymi światłowodami. Wszystkie złącza światłowodowe w eksperymencie Z55 wykonane są w standardzie FC/UPC (proszę zwrócić uwagę na występ w końcówce złącza FC/UPC światłowodu; musi ono trafić w odpowiadające mu zagłębienie w złączu; złącze należy dokręcić do lekkiego oporu!). Zliczenia fotonów dokonywane są w dwóch niezależnych kanałach oraz dodatkowo rejestrowane są zliczenia w koincydencji czasowej. Zadanie to wykonuje komputer sterownika eksperymentu. Parametry pracy sterownika reguluje się za pomocą ekranu dotykowego, pokrętła impulsatora oraz CZERWONEGO PRZYCISKU (z podświetleniem) włączającego laser diodowy. Włączenie sterownika do sieci zasilającej zabezpieczone jest kluczem (należy go przekręcić, by zasilić układ). Sterownik eksperymentu podłączony jest do sieci internetowej, w której uzyskuje dynamicznie adres IP. Możliwe jest połączenie z tym sterownikiem z komputera zainstalowanego przy eksperymencie (lub dowolnego innego działającego w sieci komputerowej 2PF) poprzez protokół VPN (interfejs graficzny) lub

podając komendy na adres IP w protokole http (można tymi komendami zmieniać wartość prądu diody, ustalać pozycje polaryzatorów, zliczać koincydencje rejestrowanych fotonów). Sterownik eksperymentu umożliwia zapisywanie danych pomiarowych do pamięci FLASH/USB podłączanej do koncentratora USB podpiętego do urządzenia (do tego samego koncentratora podłączony jest kontroler silników krokowych polaryzatorów – nie zaleca się odłączania urządzeń USB podczas pracy sterownika!).

Na stole optycznym umieszczono dodatkowe urządzenie optyczne – interferometr Michelsona [1, 2, 3]. Interferometr ten podłącza się do zestawu *qutools* jednomodowymi światłowodami korzystając ze złącz FC/UPC i specjalnych adapterów. Podczas wykonywania doświadczenia z interferowania pojedynczych fotonów należy usunąć ze stolika optycznego *qutools* obydwie polaryzatory. Polaryzatory te mocowane są do stolika śrubami imbusowymi; należy te śruby odkręcić, a polaryzatory odłożyć (zaleca się także odłączenie zasilania sterownika silników krokowych). Interferometr Michelsona wyposażony jest w śrubę mikrometryczną, której regulacja wsuwa w jedno z ramion interferometru klin optyczny. Zmiana grubości tego klina na drodze fotonów wydłuża lub skraca ich drogę optyczną. Podłączenie światłowodów interferometru do układu optycznego zestawu „*Entanglement Demonstrator*” należy wykonać dokładnie według instrukcji producenta zestawu [9].

Przygotowanie układu do pracy oraz przebieg ćwiczenia

Układ optyczny powinien być wstępnie wyregulowany przez prowadzącego ćwiczenie asystenta tak, by w obu kanałach rejestrowane były zliczenia fotonów. Podczas zajęć 2 Pracowni Fizycznej należy unikać zdejmowania osłony niebieskiego lasera, co jest konieczne do wstępnego ustawienia lusterek i kolimatorów światłowodów. Zdjęcie osłony lasera wymaga zastosowania okularów ochronnych i pracy z minimalną mocą emisji wiązki laserowej! Wstępnie wyregulowany układ optyczny wymaga korekt, które realizuje się według procedury proponowanej przez producenta zestawu i opisanej w instrukcji [6, 7]. Kryterium poprawnego justowania jest duża liczba zliczeń par fotonów w koincydencji czasowej, a także krzywe korelacji wyznaczone przy obrotach polaryzatorów. Także wartość parametru S w nierówności Clausera-Horne'a-Shimony-Holta przekraczająca 2 (możliwe jest osiągnięcie tej wartości powyżej 2,5) oraz parametr widoczności 80% i więcej świadczą o wydajnym zbieraniu par fotonów przez kolimatory. Wszelkie korekty ustawienia lusterek i kolimatorów dokonuje się w oparciu o zliczenia realizowane przez fotodiody lawinowe.

Po usunięciu z toru optycznego obu polaryzatorów oraz podłączeniu interferometru Michelsona do jednego z kanałów i wydłużeniu drogi optycznej drugiego kanału poprzez dodatkowy światłowód [9] uzyskuje się możliwość badania interferencji pojedynczych fotonów. Rejestrowane są wtedy zliczenia z fotodiody lawinowej podłączonej do interferometru w koincydencji czasowej ze zliczeniami drugiej fotodiody lawinowej podłączonej do kolimatora zbierającego fotony z kanału kontrolnego. Wstępne justowanie interferometru wykonuje się używając czerwonego (635 nm) światła spójnego z laserowego wskaźnika ze złączem światłowodowym (jest w zestawie). Dokładne justowanie interferometru należy wykonać w oparciu o zliczenia fotonów w koincydencji czasowej. Ustawienie klina optycznego podczas justowania powinno zapewniać wyrównane (z dokładnością do pojedynczych mikrometrów) długości optyczne w obu ramionach.

W zestawie eksperymentalnym Z55 drugi klin optyczny zainstalowany w interferometrze ustawiony jest w stałej pozycji (brak możliwości regulacji podczas wykonywania ćwiczenia) zapewniającej zerową różnicę dróg optycznych przy ustawieniu śruby mikrometrycznej w pozycji ok. 1,00 mm. Zakres regulacji śruby mikrometrycznej podczas eksperymentu nie przekracza ± 1 mm względem pozycji zapewniającej zerową różnicę dróg optycznych.

Opracowanie wyników pomiarów

Badanie zliczeń par fotonów przy różnych ustawieniach polaryzatorów umożliwia uzyskanie wielu różnych zestawów danych. Krzywe korelacji wyznacza się ze zliczeń przy ustawieniu jednego z polaryzatorów w pozycji H , $-$, V , $+$ i obrocie drugiego polaryzatora o 360° z zadaniem krokiem. Programuje się czas zliczania korelacji w każdej z wybranych pozycji (zazwyczaj na jeden krok przeznaczają się od 100 ms do 1000 ms). Realizacja eksperymentu SHSH pokazana została na rys. 2. Kąty ustawień polaryzatorów można zmieniać programowo według algorytmu zaproponowanego przez *qutools* lub zadając konkretne pozycje przy użyciu gałki impulsatora i panelu dotykowego sterownika eksperymentu. Układem eksperymentalnym można też sterować zdalnie. Krzywe korelacyjne, widoczność i łamanie nierówności Bella (parametr S) można oglądać w postaci graficznej (oprogramowanie sterownika *qutools*) lub obliczać z zestawu danych zapisanych w podłączonej do sterownika pamięci FLASH USB (dane zapisywane są w plikach w postaci tekstowej).

Interferometr Michelsona umożliwia zarejestrowanie zliczeń korelacji fotonów, które zostały wzmocnione i zbadane w fotodiodach lawinowych, w funkcji zmiany różnicy dróg optycznych jego ramion. Realizowane jest to poprzez wsuwanie klina optycznego w jedno z ramion interferometru. Należy obliczyć zmianę drogi optycznej przy podwójnym przejściu światła przez szkło klina (o znanym współczynniku załamania i znanym kącie pomiędzy powierzchniami [9]), zależnie od zmiany pozycji tego klina wsuwanego poprzecznie do kierunku propagacji światła w ramieniu interferometru. Przesuw klina realizuje śruba mikrometryczna, a poszczególne kroki pomiarowe powinny być wykonane z dokładnością $5\mu\text{m}$ (najmniejsza podziałka śruby) lub lepszą (według najmniejszej podziałki śruby oraz z dodatkowymi krokami pośrednimi, pomiędzy tymi najmniejszymi podziałkami).

Zasady BHP

Zestaw wyposażony jest w układ wytwarzający pary splątanych fotonów. W układzie tym działa laser diodowy emitujący światło niebieskie (widoczne okiem) o maksymalnej mocy 40 mW (przy prądzie 50 mA zasilającym diodę; kontroler nie umożliwia podanie większego prądu a tym samym wytworzenie wiązki światła o mocy przekraczającej 40 mW). Układ z laserem zamknięty jest w bezpiecznej obudowie, a światło niebieskie nie wydostaje się poza obudowę. Otwór wyjściowy obudowy (którym emitowane są splątane fotony) zabezpieczony jest filtrem optycznym pochłaniającym światło niebieskie. Pod warunkiem, że obudowa jest założona (i dodatkowo zabezpieczona śrubą mocującą), w pomieszczeniu nie trzeba używać okularów ochronnych. Obudowę demontuje się tylko podczas korygowania ustawienia luster i kolimatorów zbierających pary splątanych fotonów. Procedura wymaga włączenia lasera niebieskiego podczas ustawiania płytki celowniczej, jednak prąd diody musi

być wtedy obniżony do wartości tuż powyżej progu emisji laserowej. W praktyce wystarcza prąd o wartości około 5 mA, przy której moc emitowana jest rzędu dziesiątek mikrowatów. Zaleca się wtedy użycie okularów ochronnych (dostępne są dwie pary), zwłaszcza, że w procesie kolimowania wiązek używany jest wskaźnik laserowy (635 nm, światło czerwone) o mocy emitowanej około 1 mW. Proces korekty prowadzenia wiązek usprawnia kamera endoskopowa z monitorem, znajdująca się na wyposażeniu ćwiczenia Z55. Zakłada się, że układ optyczny jest wstępnie wyregulowany (przed rozpoczęciem ćwiczenia przez studentów) przez prowadzącego ćwiczenie pracownika WFAIS i tym samym podczas zajęć dydaktycznych nie będzie potrzeby przeprowadzania działań ze zdjętą osłoną lasera. Współczynnik konwersji kryształów BBO nie przekracza 10^{-5} i światło (pary fotonów) o długości fali 810 nm nie stanowi zagrożenia dla wzroku. Gdy osłona układu optycznego (białe prostokątne pudełko zabezpieczone śrubą) jest założona, dopuszcza się pracę bez okularów ochronnych.

Fotodiody lawinowe są bardzo czułymi detektorami. Jakiegokolwiek operacje, podczas których od wejść tych fotodiod odłączone są światłowody, wymagają zabezpieczenia złącz fotodiod czarnymi zaślepkami. Jednocześnie odłączone końcówki światłowodów muszą być zabezpieczone przed uszkodzeniami mechanicznymi odpowiednimi osłonami (znajdującymi się na wyposażeniu zestawu). Światło czerwonego lasera służącego do kolimacji nie może być podawane na wejścia światłowodów (bezpośrednio, a także poprzez kolimatory) podłączonych do fotodiody lawinowej.

Układ doświadczalny wyposażony jest w wiele delikatnych elementów optycznych (lustro, filtry optyczne, polaryzujące dzielniki wiązki pracujące jako analizatory polaryzacji, kolimatory, dzielnik wiązki w interferometrze, szklane kliny optyczne wprowadzające opóźnienie w ramionach interferometru) i należy zachować szczególną ostrożność podczas manipulowania tymi elementami, a szczególnie podczas ich demontażu i ponownego montażu do płyty optycznej). Elementami szczególnie narażonymi na uszkodzenie są oszlifowane końcówki jednomodowych światłowodów. Należy zachować szczególną ostrożność podczas podłączania tych końcówek do złączy fotodiod i innych złączy światłowodowych.

Literatura

- 1) M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, CUP Archive, 2000.
- 2) P. Grangier, G. Roger, A. Aspect, *Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences*, EPL (Europhysics Letters) **1**(4), 173 (1986).
- 3) D. J. Griffiths, D. F. Schroeter, *Wstęp do mechaniki kwantowej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2021.
- 4) J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, R. A. Holt, *Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories*, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969).
- 5) D. Dehlinger, M. W. Mitchell, *Entangled photons, nonlocality, and Bell inequalities in the undergraduate laboratory*, Am. J. Phys. **70**, 903 (2002).
- 6) quED - Entanglement Demonstrator, Quickstart Manual ver. 1.2, qutools 2019
- 7) quED - Entanglement Demonstrator, Manual ver. 1.1, qutools 2017

- 8) quED - Control and Read-out Unit, quCR Manual ver. 3.2, qutools 2019
- 9) quED-MI Manual - Michelson Interferometer, Manual ver. 1.0, qutools 2019

Instrukcje firmy *qutools* są dostępne pod adresem qutools.com/qued/ w zakładce Downloads&Links. Instrukcje te (w formacie PDF) zostały zebrane w katalogu „qutools” na pulpicie komputera sterującego zestawem (konto „Student”).

Kraków, kwiecień 2022
Tadeusz Pałasz

Załącznik – dane liczbowe zliczeń pokazanych na rys. 2:

H:22.5°	9897	/372
H:67.5°	2252	/311
H:112.5°	2156	/318
H:157.5°	10178	/385
-: 22.5°	7793	/385
-: 67.5°	5067	/322
-: 112.5°	834	/327
-: 157.5°	3632	/391
V: 22.5°	1088	/398
V: 67.5°	3651	/332
V: 112.5°	3840	/334
V: 157.5°	1164	/398
+: 22.5°	3573	/393
+: 67.5°	886	/328
+: 112.5°	5365	/333
+: 157.5°	7945	/398
