



Weryfikacja nieklasycznego rezultatu złamania nierówności Bella dla stanów splątanych (złamanie limitów statystyki klasycznej w korelacjach splątaniowych) jako fundamentalny test kwantowej losowości (nieosiągalny w klasycznym podejściu statystycznym, które może stanowić conajwyżej kryterium negatywne wykrywania niedoskonałości klasycznych w procesach kwantowych) oraz weryfikacja złamania nierówności Bella dla stanów splątanych par fotonów w polaryzacyjnych stopniach swobody generowanych w układzie laboratoryjnym SPDC w kryształ BBO stanowiącym jedną z próbek prawdziwie losowych ciągów kwantowych dla kwalifikacji modelu weryfikacji losowości kwantowej

W. A. Jacak, J. E. Jacak, W. A. Donderowicz, L. Jacak

W celu eksperymentalnego potwierdzenia złamania nierówności Bella-CHSH przez stany splątane fotonów w stopniach swobody polaryzacji wykorzystana układ laboratoryjny oparty na nieliniowym efekcie elektrodynamicznych w reżimie optyki kwantowej w efekcie spontanicznej parametrycznej konwersji w dół (SPDC) w kryształ BBO beta-boranu baru (schemat na rys. 1). Jest to układ umożliwiający realizację splątaniowej kryptografii kwantowej na stanach polaryzacyjnych fotonów, jednak pozwala również przeprowadzić test Bella według eksperymentu Aspecta *et al.* [1].

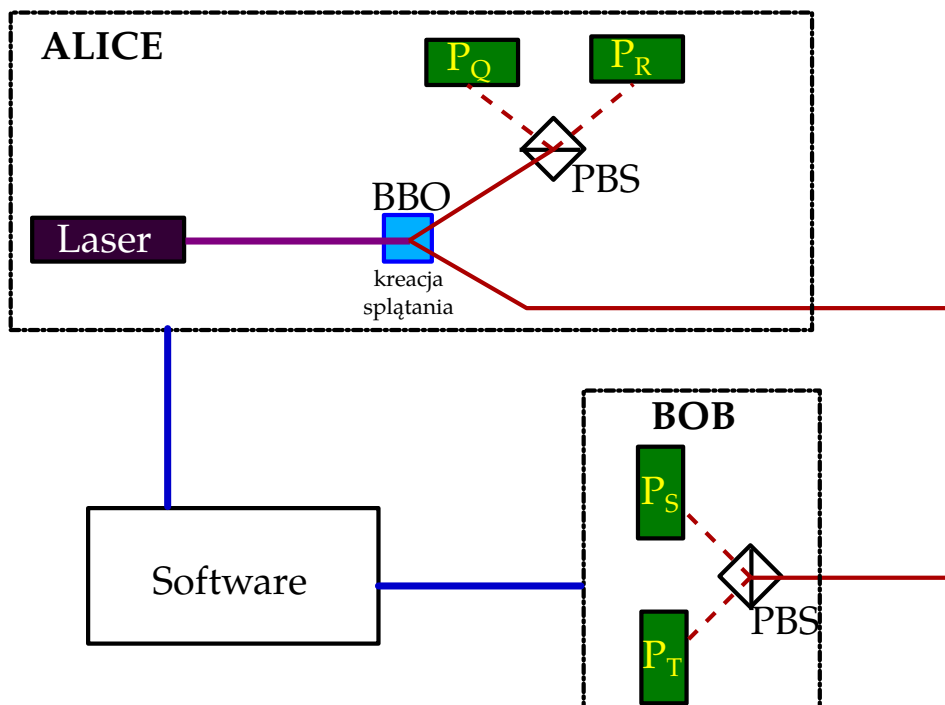


Fig. 1: Schemat układu generacji splątaniwa kwantowego fotonów

Układ wyposażony jest w dwa moduły, moduł Alice i moduł Boba. W skład modułu Boba wchodzi jedynie układ detekcyjny (4 detektory, po jednym dla każdej polaryzacji) wraz z towarzyszącą elektroniką oraz układem optycznym

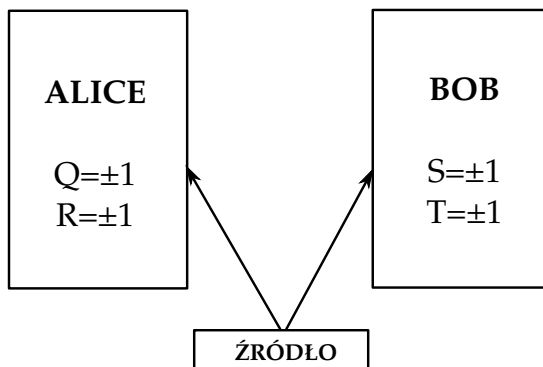


Fig. 2: Schemat eksperymentu sprawdzenia złamania nierówności Bella

do transmisji *open-space*, moduł Alice posiada oprócz tego układ do generacji splątanych fotonów. Splątanie jest uzyskiwane poprzez pompowanie kryształu BBO wiązką laserową, gdzie zachodzi zjawisko SPDC. Następnie jeden ze splątanych fotonów jest mierzony po stronie Alice, drugi jest wysyłany światłowodowo bądź w wiązce optycznej w przestrzeni do modułu Boba. Zestaw jest wyposażony również w układy synchronizujące TTM (Time-Tagging-Module), które dopilnowują aby zliczenia fotonów na detektorach pochodziły od jednej pary fotonów. [2] Ze względu na to, że foton Alice jest mierzony od razu, natomiast foton Boba musi pokonać dłuższą drogę, jest on mierzony minimalnie później, jednak nie zaburza to niezależności pomiarów — chcąc w jakikolwiek sposób wpłynąć na wynik pomiaru Boba, Alice musiałaby przekazać informację oddziaływaniem fizycznym — a to nie może propagować się z prędkością większą od prędkości światła, z którą porusza się foton Boba.

Dane z detektorów są przesyłane do komputera, gdzie oprogramowanie zapisuje je w formie macierzy  $4 \times 4$ . Mierzona jest polaryzacja fotonów, wyniki są interpretowane według tabeli 1.

Alice		Bob	
Wynik	Polaryzacja	Wynik	Polaryzacja
Q-	$0^\circ$	S-	$0^\circ$
Q+	$90^\circ$	S+	$90^\circ$
R-	$45^\circ$	T-	$45^\circ$
R+	$135^\circ$	T+	$135^\circ$

Table 1: Interpretacja wyników w stosunku do schematu na rys. 2

Przykładowa macierz odczytów przedstawiona jest w tabeli 2. Czcionką pogrubioną oznaczono pomiary, w których powinny wystąpić korelacje — zostały wykonane w tej samej bazie. W przypadku niezgodności baz Alice i Boba wynik pomiaru dokonanego przez tego drugiego jest całkowicie losowy, jako że dwie wybrane bazy są w stosunku do siebie maksymalnie nieortogonalne: stan z bazy diagonalnej można zapisać w bazie horyzontalno-wertykalnej jako

$$|\psi\rangle_D = \frac{|0\rangle_{VH} \pm |1\rangle_{VH}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$



—	S-	S+	T-	T+
Q-	<b>5</b>	<b>178</b>	126	63
Q+	<b>181</b>	<b>4</b>	48	103
R-	48	72	<b>9</b>	<b>118</b>
R+	131	48	<b>165</b>	<b>9</b>

Table 2: Macierz odczytów detektorów

Wartość średnia (bądź też współczynnik korelacji)  $E(a, b)$  jest obliczana na podstawie ilości zliczeń w każdej parze baz, wg. wzoru [1]:

$$E(a, b) = \frac{N_{++} + N_{--} - N_{+-} - N_{-+}}{N_{++} + N_{--} + N_{+-} + N_{-+}} \quad (2)$$

gdzie  $N_{\pm\pm}$  oznacza liczbę zliczeń zarejestrowanych dla wyniku  $\pm$  odpowiednio w bazie Alice i Boba.

Wykresy 3–9 przedstawiają obliczone na podstawie przeprowadzonych pomiarów wartości nierówności Bella-CHSH w różnych warunkach (różne długości światłowodów, różna liczba złączy pomiędzy fragmentami światłowodu). Każda seria pomiarowa obejmuje 1000 macierzy odczytów w danych warunkach, dla każdej macierzy obliczona została wartość  $S$ . Dodatkowo na wykresie 9 przedstawiono wyniki pomiarów w odwróconej konfiguracji — światłowód pomiędzy modułami Alice i Boba miał długość 2 metrów, bez złączy, natomiast wydłużono drogę pomiędzy źródłem splątanych fotonów i detektorami Alice z 1 do 4 metrów (we wszystkich poprzednich pomiarach ta długość jest stała i wynosi 1 metr).

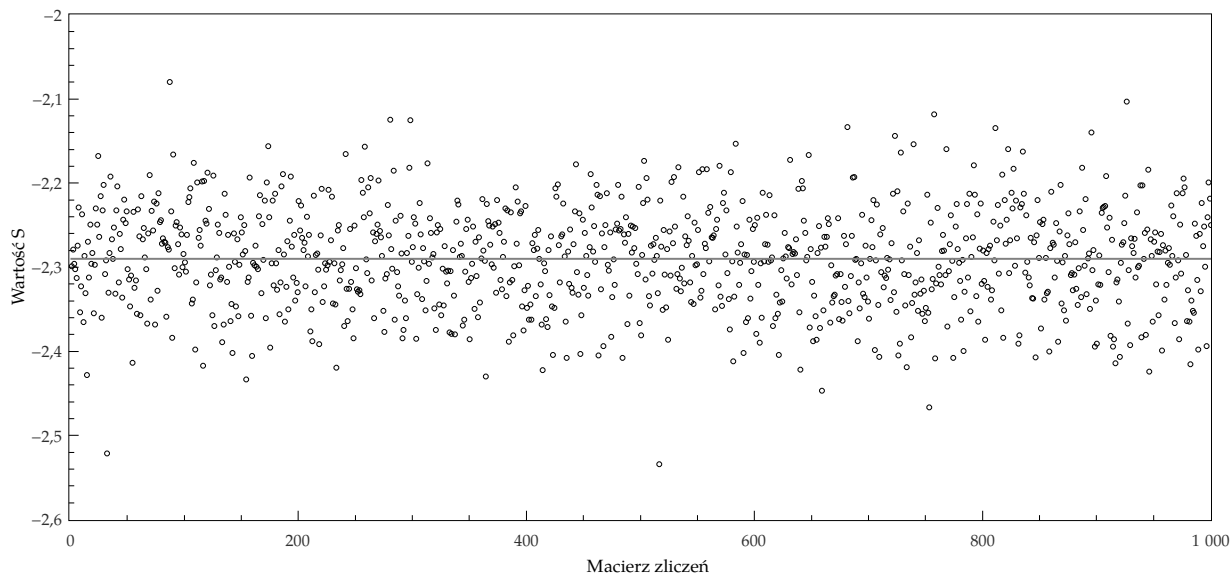


Fig. 3: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 4m.

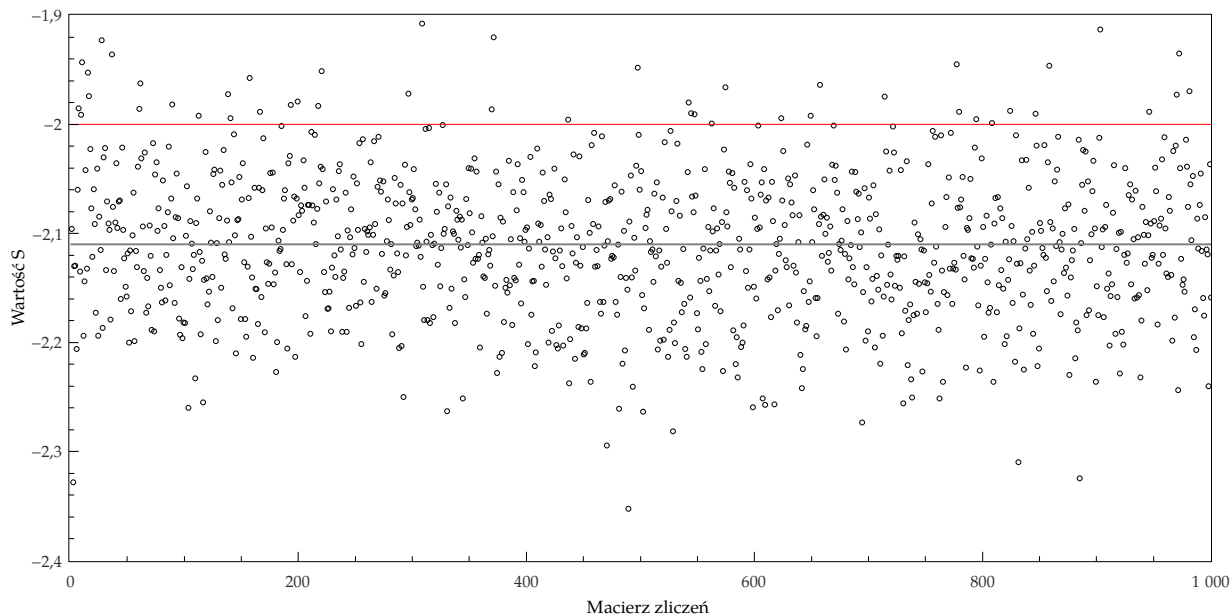


Fig. 4: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 1m - złącze - 1m.

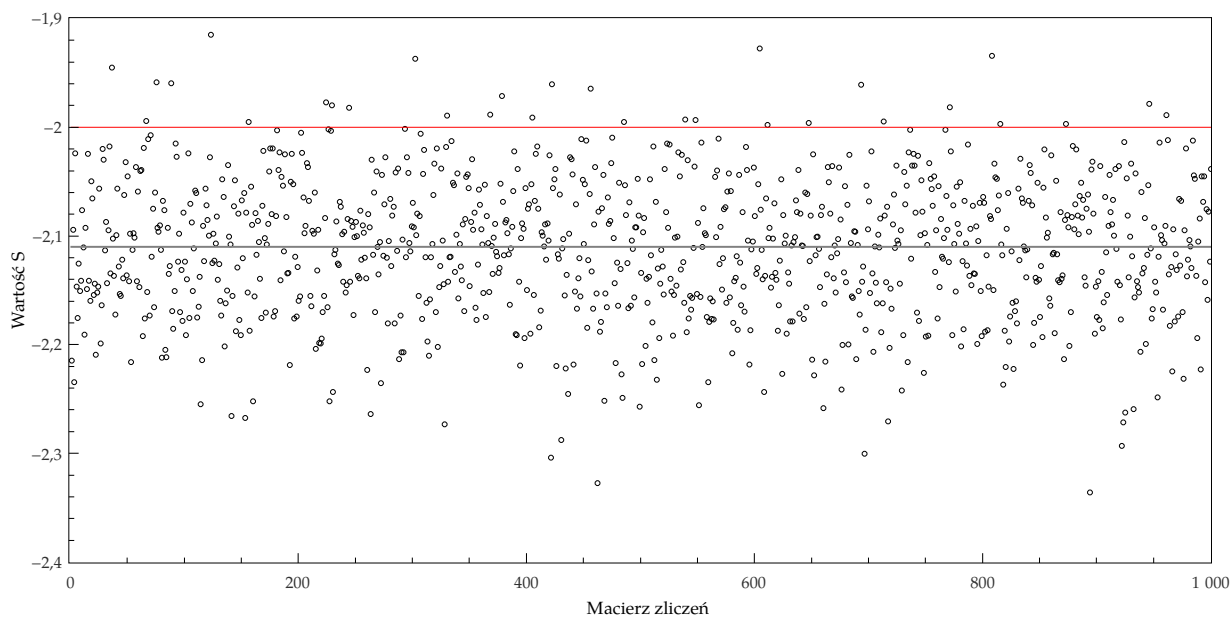


Fig. 5: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 4m - złącze - 1m.

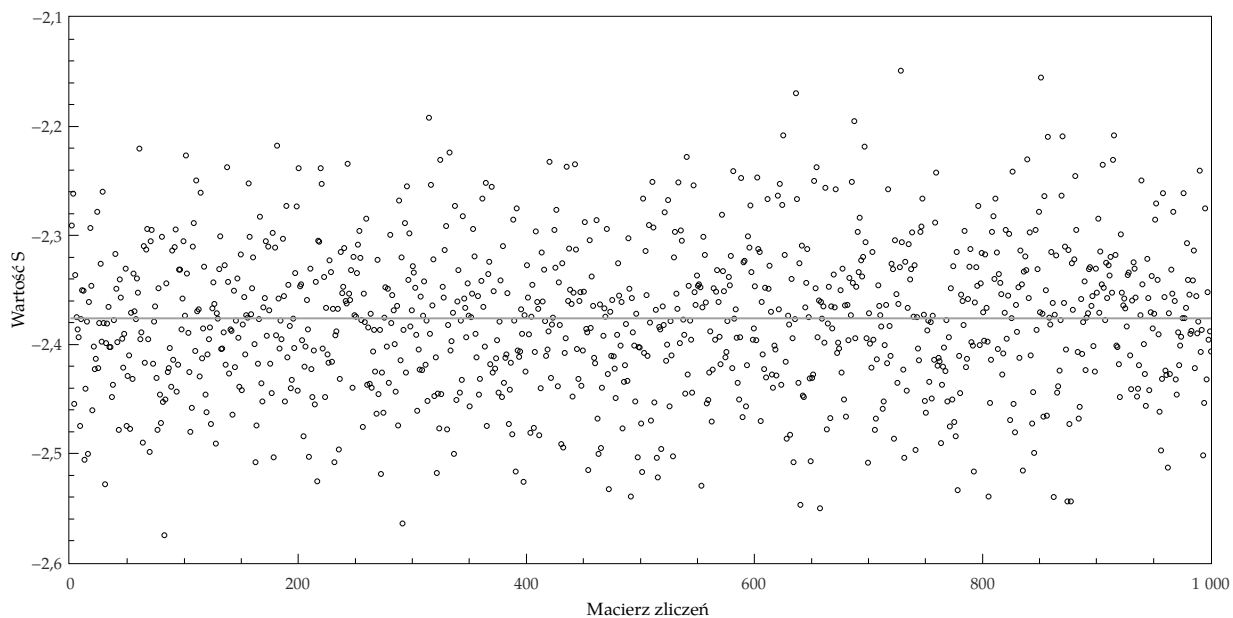


Fig. 6: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 1m - złącze - 1m - złącze - 1m.

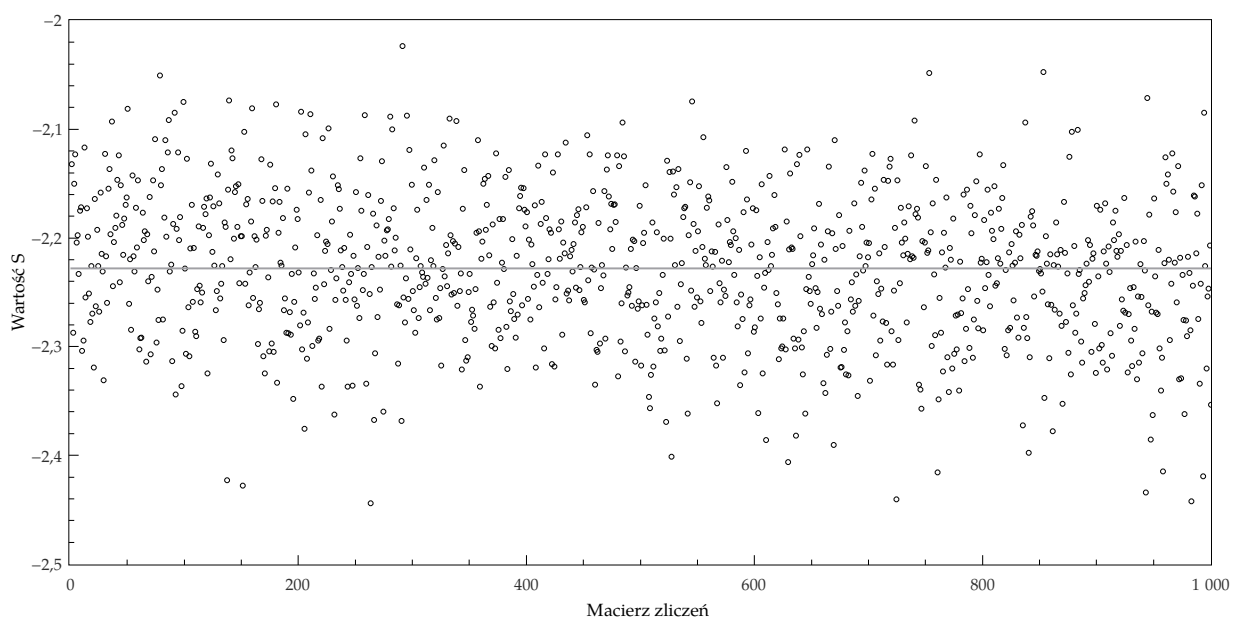


Fig. 7: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 1m - złącze - 2m - złącze - 1m.

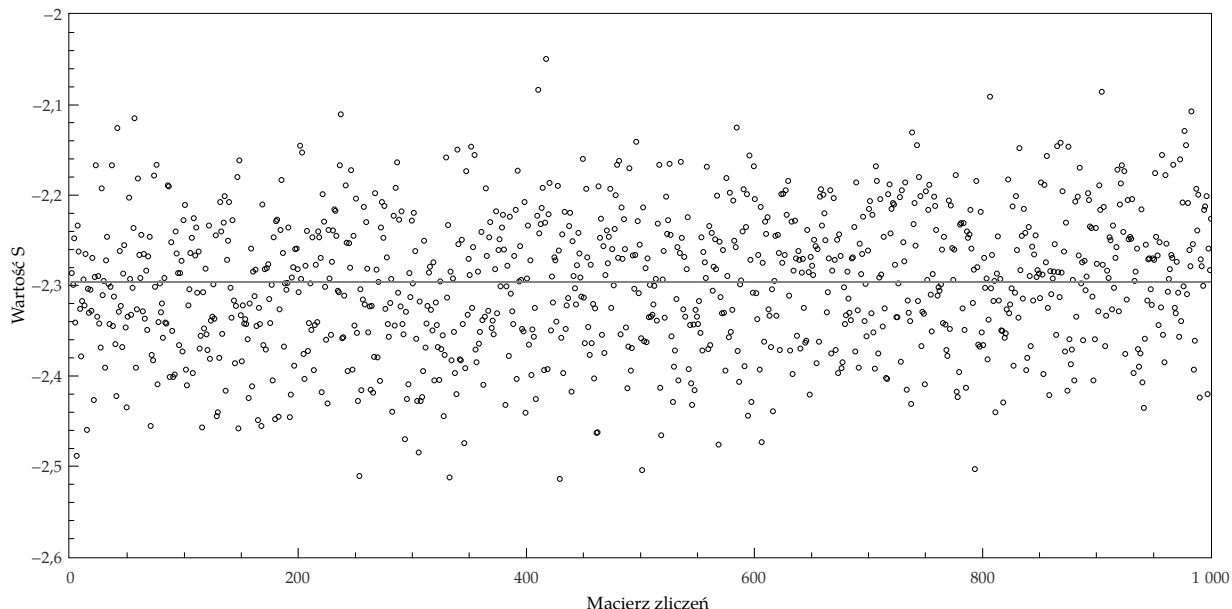


Fig. 8: Wartości  $S$  przy użyciu światłowodu 1m - złącze - 4m - złącze - 1m.

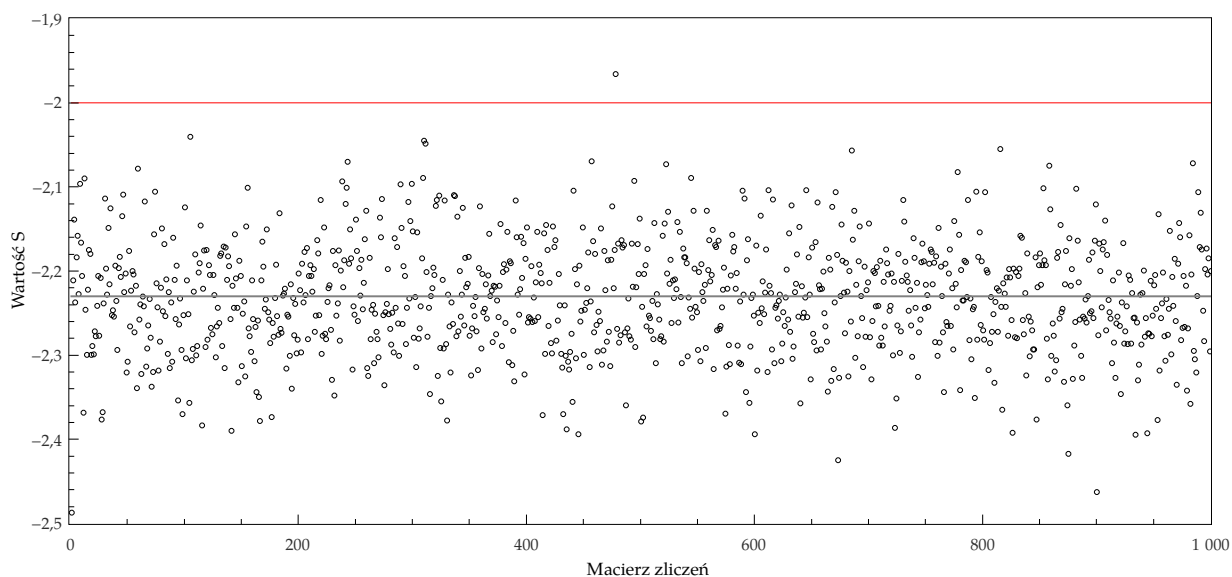


Fig. 9: Wartości  $S$  przy zmienionej konfiguracji.

Szara linia na każdym z wykresów zaznacza średnią wartość  $S$  z 1000 obliczonych, natomiast czerwona linia na poziomie wartości  $-2$  wskazuje klasyczny limit, który musi zostać przekroczony jeśli mamy do czynienia ze stanem splątany.

W każdej serii uzyskano złamanie nierówności Bella-CHSH w co najmniej 96,8% przypadków. Najwyższe wartości złamanych nierówności zamykają się w przedziale  $-2,3 - -2,6$ , nie osiągają jednak granicznej wartości  $-2\sqrt{2}$ . Oznacza to, że nie mamy do czynienia z czystym stanem Bella — dwa fotony są ze sobą splątane, jednakże jest to stan mieszany. Spowodowane jest to dekoherencją, jakiej ulegają fotony podczas drogi w światłowodzie, oddziałując z otoczeniem. Takie niepełne splątanie jest wystarczające w protokołach QKD, jednak do zastosowań w komunikacji kwantowej konieczne jest użycie stanów jak najbardziej zbliżonych do stanów Bella. W takim celu stosuje się procesy destylacji i



puryfikacji splątania opisane w literaturze dziedzinowej.

Pomiary, których wyniki przedstawiono na rys. 9 wykazują, że splątanie jest zachowane niezależnie od umieszczenia źródła na drodze pomiędzy układami. Nawet kiedy układ był skonfigurowany tak, że pierwszy pomiar fotonu odbywał się po stronie Boba, a nie zgodnie z założeniami producenta po stronie Alice, korelacje pomiędzy stanami fotonów po pomiarze obu zostały zachowane.

## References

- [1] A. A., "Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities," *Phys. Rev. Lett.* **49**, p. 91, 1982.
- [2] "Ait qkd software project documentation," *Austrian Institute of Technology* , p. 2010.