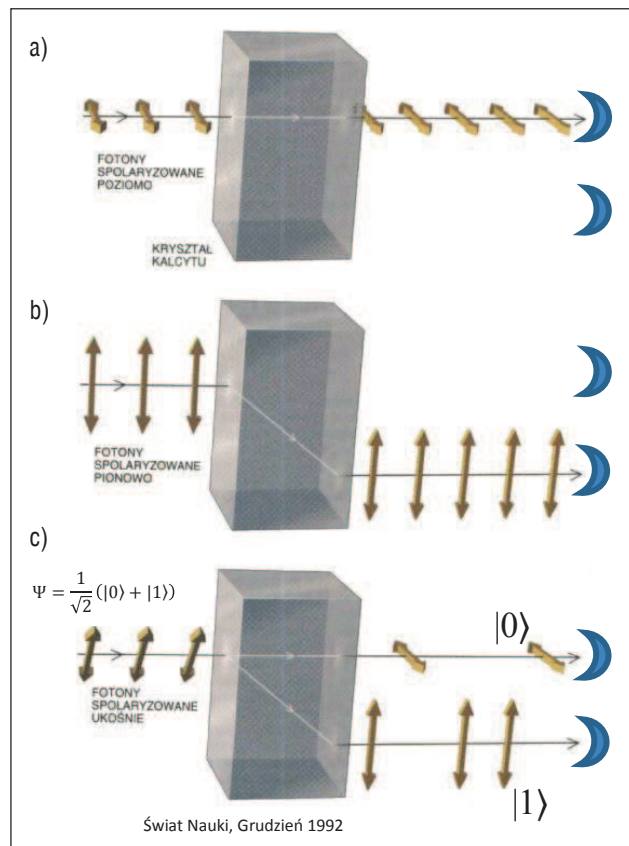


Ryszard Horodecki, członek korespondent PAN W LABIRYNCIE KWANTOWYCH KORELACJI

Fenomen kwantowych korelacji zogniskował wysiłek wielu ośrodków naukowych zarówno po stronie teorii, jak i eksperymentu. Historia jego sięga korzeniami odkrycia kwantowego obrazu Natury, które wstrząsnęło podstawami nauk przyrodniczych. Na początku ubiegłego wieku „harmonia sfer” deterministycznego opisu świata rozbiła się o zjawisko promieniowania ciała doskonale czarnego, z którym stykali się nasi przodkowie przy wypieku chleba, kiedy po kolorze ścianek pieca, bez termometru szacowali temperaturę. Aby być w zgodzie z eksperymentem, Max Planck (1900) musiał założyć, że atomy mogą wysyłać i pochłaniać promieniowanie tylko w ściśle określonych porcjach energetycznych – kwantach energii, które Albert Einstein potem utożsamiał z fotonami – kwantami światła. Dopiero pod koniec XX wieku dzięki niebywałemu rozwojowi kwantowych technologii udało się wytworzyć źródła pojedynczych fotonów, a także rejestrujące je detektory. Te osobliwe nośniki informacji nie tylko poruszają się z prędkością światła, ale także wykonują drgania w dowolnych kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu. Dzięki polaryzatorom możemy filtrować określony kierunek drgań. Gdy foton spolaryzowany w płaszczyźnie poziomej skierujemy na kryształ kalcytu, to z pewnością (prawdopodobieństwem 1) trafi on do górnego detektora (rys.1a). Podobnie foton „pionowy” zawsze trafi do dolnego (rys. 1b). Co się jednak stanie gdy na kryształ skierujemy foton spolaryzowany ukośnie (rys.1c)? Otóż wtedy nie można przewidzieć, którą z dróg wybierze. Ta wewnętrzna probabilistyczna natura fotonu, jak wiele innych zjawisk kwantowych, wyłamuje się z deterministycznej „harmonii sfer”.

Szukając języka dla „kwantowej” fenomenologii Heisenberg (1925) i Schrödinger (1926) odkryli dwie twarze mikroświata, jako alternatywne reprezentacje tej samej matematycznej struktury, nazwane mechaniką kwantową. Nowy język wzbogacony i sformalizowany jawił się jak inskrypcja na kamie-

niu z Rossetty. Miejsce klasycznej czasoprzestrzeni jako areny fizycznych zdarzeń zajęła abstrakcyjna przestrzeń Hilberta. W tej przestrzeni z każdym układem fizycznym jest stowarzyszona funkcja falowa Ψ (stan czysty układu), maksymalna probabilistyczna informacja o układzie. Inskrypcja stanowi instrukcję – zbiór „przepisów” określających sposób probabilistycznego przewidywania wyników przyszłych pomiarów w laboratoriach. To kolosalne odkrycie drastycznie zmieniło nasze wyobrażenia o naturze mikroobiektów.



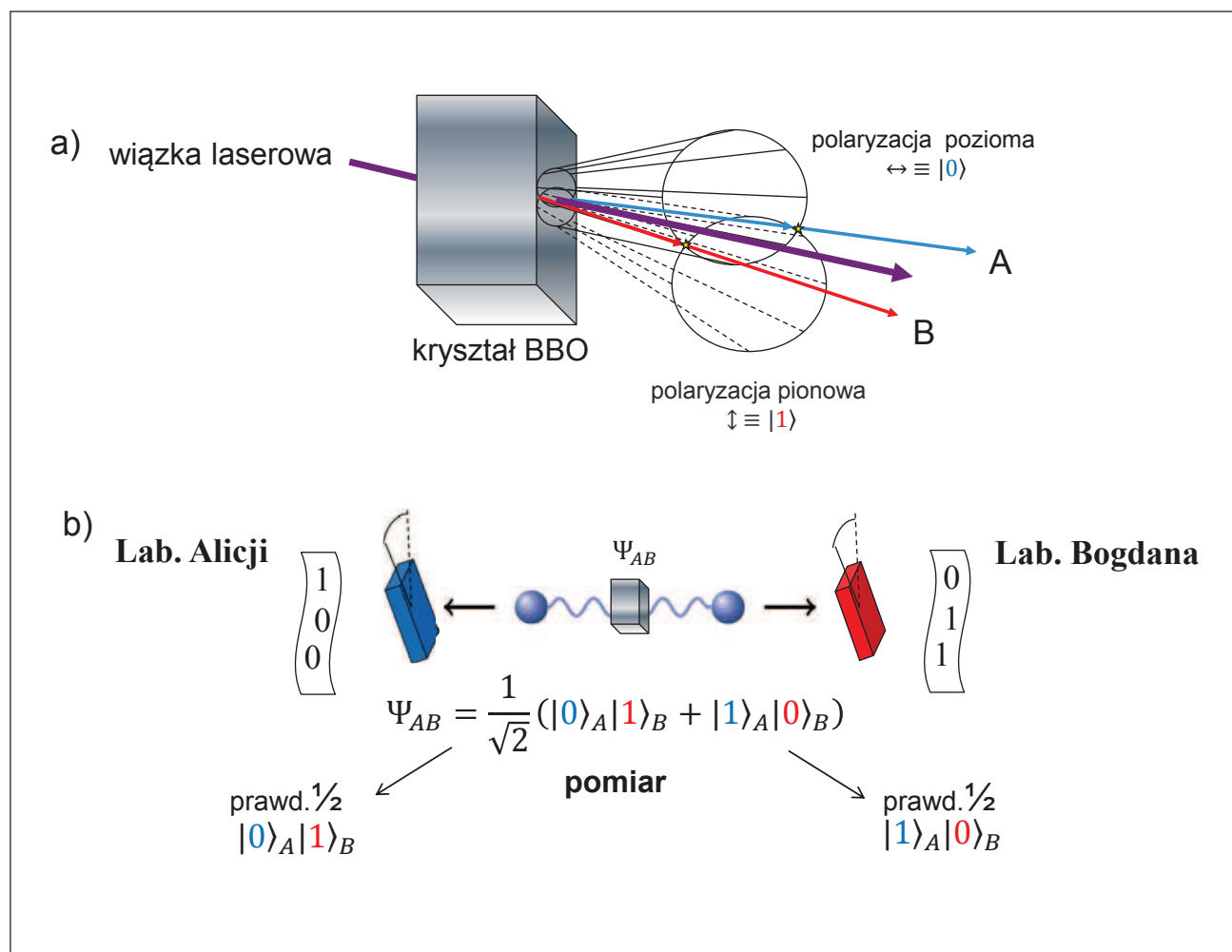
Rys. 1 Foton spolaryzowany skierowany na kryształ kalcytu: a) polaryzacja pozioma b) polaryzacja pionowa c) polaryzacja ukośna – foton w stanie superpozycji Ψ pod wpływem pomiaru „decyduje się” z prawdopodobieństwem $P(|0\rangle) = P(|1\rangle) = 1/2$ na przejście do stanu $|0\rangle$ lub $|1\rangle$.

W powyższym przykładzie inskrypcja żąda, aby foton spolaryzowany ukośnie padający na kryształ kalcytu zachowywał się tak, jakby był w stanie Ψ będącym superpozycją stanów polaryzacji poziomej $|0\rangle$ i pionowej $|1\rangle$: $\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$. Dopiero pod wpływem pomiaru, foton „decyduje się” z prawdopodobieństwem równym kwadratowi czynnika liczbowego występującego w superpozycji $p = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}$ na przejście do stanu $|0\rangle$ lub $|1\rangle$ odpowiadających polaryzacji poziomej (górny detektor) i pionowej (dolny detektor) (rys. 1c).

Bardzo trudno było wyabstrahować zdawałoby się oczywisty fakt, że foton niesie jednostkę kwantowej informacji – kwantowy bit (kubit). Pojęcie to

zrewolucjonizowało nasze myślenie o naturze informacji. Można się tylko dziwić, że kwantowa inskrypcja przez pół wieku kryła „banalną” tajemnicę – kubit nie można wiernie skopiować. Ta właśnie cecha odróżnia kwantową informację od klasycznej i legła u podstaw kwantowej kryptografii.

Zdumiewającą przepowiednią kwantowej inskrypcji jest istnienie w Naturze osobliwych korelacji między własnościami odległych cząstek nazwanych splątaniem. Szczęśliwie, fizycy znaleźli wiele metod wytwarzania w laboratorium splątanej pary fotonów. Na przykład, skierowując wiązkę lasera na kryształ beta boranu baru można wytworzyć pary fotonów o skorelowanych polaryzacjach.



Rys. 2 a) Generacja par fotonów skorelowanych w polaryzacjach; b) fotony splątane w polaryzacji pod wpływem pomiaru „decydują” się z prawdopodobieństwem $p=1/2$ na przejście do stanu $|0\rangle_A|1\rangle_B$ lub $|1\rangle_A|0\rangle_B$

Na rys. 2a są to fotony wylatujące wzdłuż linii przecięcia się stożków górnego z polaryzacją poziomą i dolnego z pionową. Ponieważ nie potrafimy odróżnić, z którego stożka pochodzi foton, kwantowa inskrypcja zmusza nas do zapisu tej sytuacji jako superpozycji maksymalnie splątanych fotonów, tj. $\Psi_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A |1\rangle_B + |1\rangle_A |0\rangle_B)$. Jeśli teraz bliźniacze fotony pošemy do odległych laboratoriów Alicji (A) i Bogdana (B), którzy mierzą polaryzację używając identycznie ustawionych polaryzatorów, to pod wpływem pomiaru fotony decydują się z prawdopodobieństwem $p = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}$ na przejście do stanu $|0\rangle_A |1\rangle_B$ lub $|1\rangle_A |0\rangle_B$ (rys. 2b). Fizycznie oznacza to, że gdy Alicja na swoim fotonie zaobserwuje polaryzację poziomą, ma pewność, że foton Bogdana był spolaryzowany pionowo i *vice versa*. Rezultaty ich własnych pomiarów pojawiają się z prawdopodobieństwem $p = \frac{1}{2}$, czyli są zupełnie przypadkowe. Kiedy jednak porównają swoje wyniki (np. przez telefon), to odkryją, że mają idealnie skorelowane losowe ciągi bitów (rys. 2b).

Korelacje te są niezwykle. Jak pokazał Bell, są one silniejsze niż wynikałoby to z „naturalnych” założeń, że fotony mają określone wartości polaryzacji przed pomiarem i nie ma oddziaływań szybszych od światła między laboratoriami. Są z natury monogamiczne, tzn. para maksymalnie splątanych fotonów jest kompletnie odkorelowana od reszty świata, co oznacza, że wyników tych nikt wcześniej nie mógł znać.

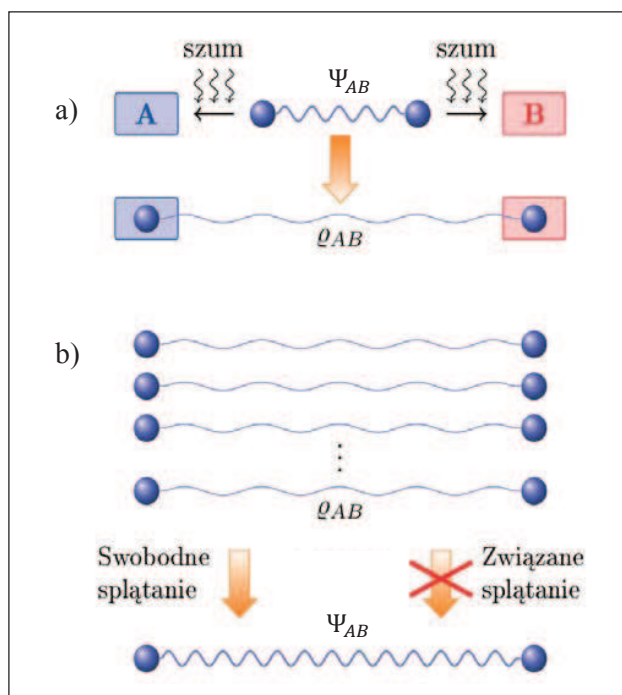
Artur Ekert jako pierwszy spostrzegł, że własność monogamii splątania pozwala generować bezpieczny klucz kryptograficzny. Rzeczywiście, jakakolwiek próba „doplątania się” do maksymalnie skorelowanej pary degraduje jej korelacje, co zostanie wykryte przez Alicję i Bogdana. Wkrótce splątanie stało się zasobem nie tylko dla kwantowej kryptografii, ale także dla kwantowej teleportacji i gęstego kodowania. Pamiętam, jak silne wrażenie zrobił na mnie fakt, że te „kanoniczne” efekty były zakodowane w kwantowej inskrypcji. Moja pasja udzieliła się wtedy synom, którzy otrzymali wykształcenie na rodzimym Uniwersytecie Gdańskim. Już jako studenci włączyli się w pracę badawczą. W naturalny sposób powstał więc zespół, który miał potem wejść do współpracy ze

światowymi liderami z kwantowej informatyki.

Na początku lat dziewięćdziesiątych tylko kilka zespołów na świecie zajmowało się rozszyfrowywaniem niezwykle złożonej struktury kwantowego splątania. Pisząc w 1993 roku swoją pracę *Układy informacyjnie spójne* miałem odczucie, że szczelina między kwantowym splątaniem a klasycznymi korelacjami jest wejściem do labiryntu pełnego niespodzianek. Moja przygoda z nim zaczęła się od paradoksu Schrödingera, który najlepiej widać na rys. 2b. Polaryzacje fotonów zmierzone niezależnie przez każdego z partnerów są kompletnie chaotyczne, podczas gdy na odległość są idealnie skorelowane. W następnym roku, wraz z synem Pawłem dowiedliśmy, że to właśnie splątanie jest odpowiedzialne za kwantowy porządek niewystępujący w świecie klasycznym. Nie byłem wtedy świadom, że dotknęliśmy rdzenia informacji kwantowej i że nasz rezultat odegra rolę w odkryciu ujemnej kwantowej informacji przez Michała Horodeckiego, Jonathana Oppenheima i Andreeasa Wintera, którzy przebywali wówczas w Instytucie Newtona w Cambridge.

Praktyczna detekcja kwantowego splątania. Doświadczalnicy najlepiej wiedzą, jak delikatnym zasobem jest splątanie. Niezwykle czułe na zaburzenia środowiska, podlega szybko degradacji. W naszym przykładzie oznacza to, że ciągi losowe Alicji i Bogdana nie są stuprocentowo skorelowane, pojawiają się błędy. Mówimy wtedy, że splątane fotony przechodzą ze stanu czystego Ψ_{AB} do stanu mieszanego ρ_{AB} z zaszumionym splątaniem (rys. 3a). Niestabilność splątania zmobilizowała fizyków do pracy nad fundamentalnym zagadnieniem: jak weryfikować, destylować i opisywać ilościowo splątanie wytworzone w laboratorium?

W 1996 roku, pracując nad pierwszym problemem dowiedliśmy, że stan przygotowany w laboratorium ρ_{AB} jest splątany wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje taka wielkość obserwowalna (tzw. świadek splątania), której wartość średnia w tym stanie jest ujemna, podczas gdy jest ona zawsze nieujemna dla wszystkich niesplątanych stanów zwanych separowalnymi. Był to kamień węgielny detekcji splątania w laboratorium. Popularność detekcji splątania metodą świadków wynika z jej prostoty i ekonomii.



Rys. 3 a) Działanie szumu; b) destylacja splątania.

Często wystarczy pomierzyć tylko jedną lub dwie obserwable (np. wartości spinu lub polaryzacji), aby stwierdzić obecność splątania. Metoda świadków jest szeroko stosowana m.in. w kwantowej kryptografii, kwantowej optyce, nanofizyce, spinowych układach, wielokrotnych kwantowych eksperymentach NMR, detekcji wieloukładowego splątania oraz ilościowaniu splątania.

Związane splątanie – tajemnicza inwencja Natury. Równoległe z nami pracował zespół C. H. Bennetta nad problemem, jak odwrócić degradację czystego splątania. Owocem ich pracy był protokół destylacji zaszumionego splątania. Czyżby autorzy odkryli uniwersalną, maszynę do destylacji splątania? Natychmiast postanowiliśmy wypróbować protokół. Sprawdził się on dla wszystkich zaszumionych stanów splątanych układów złożonych z dwóch kubitów. Gdy jednak przeszliśmy do bardziej skomplikowanych układów, okazało się, że nie tylko ten protokół nie zadziała, ale żaden inny nie wydestyluje z nich splątania. Mglisty busz kwantowego formalizmu maskował fundamentalne ograniczenie: środowisko może w sposób nieodwracalny uwięzić splątanie w szumie! Było to dla nas fascynujące. Oznaczało,

że istnieje osobliwy rodzaj „związanego” splątania, które nie daje się wydestylować do czystej postaci. Zatem w przyrodzie występują przynajmniej dwa rodzaje zaszumionego splątania: swobodne (destylowalne) i związane (niedestylowalne) (rys. 3b).

Odkrycie związanego splątania (1998) poruszyło fizyków (*Bound entanglement tells us that life is not so simple...*) i wywołało szereg fundamentalnych pytań dotyczących jego natury. Z początku wydawało się, że jest ono pasywne, gdyż jest niezdatne do wykonania nieklasycznych zadań, takich, jak teleportacja kubitów. Jednak w następnym roku, bazując na termodynamicznych analogiach, udało nam się znaleźć protokół, który pozwala „aktywować” związane splątanie. Otworzyło to nowe kierunki badań. W szczególności P. Shor i inni odkryli silniejszy efekt tzw. superaktywację splątania, który gra ważną rolę w kwantowej komunikacji, a którego G. Smith i J. Yard podali ostatnio komunikacyjny wariant legitymujący się dziwną algebrą: dwa kanały kwantowe o zerowej pojemności – połączone mają pojemność niezerową.

Pod koniec ubiegłego wieku nie było żadnych podstaw, aby podejrzewać, że związane splątanie może być przydatne do kwantowej kryptografii. Dlatego fizycy byli zaskoczeni, kiedy mój zespół udowodnił, że choć związane splątanie jest niedestylowalne, można z niego otrzymać klucz kryptograficzny. Prowadziło to do nowego typu protokołu kryptograficznego w reżimie szumu, dla którego ani słynny protokół C. B. Bennetta i G. Brassarda, ani jego destylacyjne wersje nie są w stanie pracować. Zespół koordynowany przez K. Banaszka i P. Horodeckiego współpracujący w ramach Narodowego Laboratorium Technologii Kwantowych pokazał po raz pierwszy doświadczalnie, że mimo trudności z destylacją splątania można wydajnie przesyłać klucz kryptograficzny.

Splątanie związane w laboratorium. Eksperymentalna realizacja stanów ze związanym splątaniem okazała się niemalym wyzwaniem. Dopiero w 2009 roku zespół M. Bourennane ze Sztokholmu wytworzył je na świetle, lecz eksperyment nie był w pełni przekonujący. Wkrótce zespół Rainera Kaltenbeka z Waterloo, w którego skład wchodził Marco

Piani, wytworzył prawdziwe (stabilne) związane splątanie na świetle. W tym samym roku niezależnie związane splątanie zostało zrealizowane w Dortmundzie na NMR, w Innsbrucku na jonach i w Hanowerze na świetle w ciągłym reżimie. W 2011 roku zespół F. Kanedyz Japonii wykonał po raz pierwszy w laboratorium przewidzianą przez nas w 1999 roku aktywację związanego splątania.

Kwantowe korelacje bez splątania. Nie jest tu miejsce na pełną prezentację rezultatów zespołu, trudno jednak pominąć odkrycie innego rodzaju kwantowych korelacji, które mogą istnieć nawet bez kwantowego splątania. Mój zespół był jednym z pierwszych, który badał naturę tych korelacji. W 2002 roku wraz z Jonathanem Oppenheimem, który przygodę z kwantową informacją rozpoczął w moim zespole, odkryliśmy związek między korelacjami kwantowymi a termodynamiką. W szczególności pokazaliśmy, że korelacje te stanowią cenny zasób dla mikrosilników. Kilka lat później w pracy z Marco Pianim, przebywającym wówczas na stażu podoktorskim w Gdańsku, dowiedliśmy fundamentalnego twierdzenia: kwantowych korelacji bez splątania nie można rozgłaszać lokalnie. Była to pierwsza operacyjna charakteryzacja tych korelacji. Obecnie wielkim wyzwaniem jest opis ilościowy wielocząst-

kowych kwantowych korelacji. Pierwszy krok w kierunku zbudowania jednolitych podstaw takiego opisu polegał na wprowadzeniu postulatów (z C. H. Bennettem i A. Grudką), które musi spełniać każda dobra miara takich korelacji.

Ponadto uzyskaliśmy wiele innych wyników dotyczących np. nierówności Bella, aksjomatyzacji miar splątania, kwantowej teleportacji oraz kanałów kwantowych. Wyniki te są obecnie szeroko cytowane.

Moi uczniowie, a także ich uczniowie rozwijają zastosowania kwantowego splątania w kryptografii, komunikacji kwantowej, kwantowym obliczaniu ze szczególnym uwzględnieniem teorii korekcji błędów oraz związku kwantowego splątania z termodynamiką. Obecnie w zespole prowadzone są m.in. badania z zakresu teorii korelacji kwantowych, zasad nieoznaczoności, ogólnej charakteryzacji zasobów kwantowych, włączając tzw. kwantową kontekstualność.

O żywotności kwantowej informatyki świadczy przyznanie w 2011 roku grantu Europejskiej Komisji ds. Badań Naukowych w konkursie „Ideas” Advanced Grant, a także fakt, że nasza publikacja w „Reviews of Modern Physics” znalazła się na trzeciej pozycji na liście najczęściej cytowanych prac (tzw. *hot papers*) z fizyki opublikowanych w ostatnich dwóch latach.

Piśmiennictwo

1. R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, K. Horodecki (2009). Quantum entanglement, *Rev. Mod. Phys.* 81,865.
2. B. Terhal, M. Wolf, A. Doherty (2003). Quantum Entanglement: A Modern Perspective. *Physics Today* 56, 46.
3. R. Horodecki (2010). Bound entanglement – mysterious invention of Nature, *Europhysics News* 41, 6.
4. G. Alber, T. Beth, M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, M. Rottler, H. Weinfurter, R. F. Werner, A. Zeilinger, Quantum information: an introduction to basic theoretical concept and experiments, (2001). *Quantum Information Book Series: Springer Tract in Modern*, 173,151.
5. M. Horodecki, J. Oppenheim, A. Winter (2005). Partial quantum information, *Nature* 436, 673.
6. K. Modi, A. Brodutch, H. Cable, T. Paterek, V. Vedral (2012). Quantum discord and other measures of quantum correlations, *przesłane do Rev. Mod. Phys.* (arXiv: 1112.6238).