

TELEPORTACJA KWANTOWA

Wprowadzenie

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy,

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Jest to zjawisko z pewnością zadziwiające, a nawet pozornie tajemnicze.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Jest to zjawisko z pewnością zadziwiające, a nawet pozornie tajemnicze.

Teleportacja kwantowa jest jednak oparta na fundamentalnych prawach mechaniki kwantowej.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Jest to zjawisko z pewnością zadziwiające, a nawet pozornie tajemnicze.

Teleportacja kwantowa jest jednak oparta na fundamentalnych prawach mechaniki kwantowej. Pomimo konotacji z literaturą *science fiction*, teleportacja kubitów jest zjawiskiem realnym i została zrealizowana w wielu eksperymentach, głównie z udziałem fotonów.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Jest to zjawisko z pewnością zadziwiające, a nawet pozornie tajemnicze.

Teleportacja kwantowa jest jednak oparta na fundamentalnych prawach mechaniki kwantowej. Pomimo konotacji z literaturą *science fiction*, teleportacja kubitów jest zjawiskiem realnym i została zrealizowana w wielu eksperymentach, głównie z udziałem fotonów.

Podczas teleportacji przesyłanie informacji odbywa się przy użyciu **klasycznego kanału przekazu informacji**, który łączy nadawcę i odbiorcę.

Teleportacja kwantowa polega na przesyłaniu stanów cząstek kwantowych na odległość od nadawcy do odbiorcy. Przesyłane stany nie są znane nadawcy, gdyby bowiem były znane, to zjawisko to polegałoby na trywialnym odtwarzaniu zmierzonych wcześniej stanów.

Jest to zjawisko z pewnością zadziwiające, a nawet pozornie tajemnicze.

Teleportacja kwantowa jest jednak oparta na fundamentalnych prawach mechaniki kwantowej. Pomimo konotacji z literaturą *science fiction*, teleportacja kubitów jest zjawiskiem realnym i została zrealizowana w wielu eksperymentach, głównie z udziałem fotonów.

Podczas teleportacji przesyłanie informacji odbywa się przy użyciu **klasycznego kanału przekazu informacji**, który łączy nadawcę i odbiorcę. Natomiast do przekształcania kubitów używane są bramki kwantowe.

Procedura teleportacji kwantowej odbywa się w czterech krokach, które w przypadku teleportacji pojedynczego kubitów wyglądają następująco:

Procedura teleportacji kwantowej odbywa się w czterech krokach, które w przypadku teleportacji pojedynczego kubitów wyglądają następująco:

- (1) Nadawca i odbiorca otrzymują po jednej cząstce z pary, która znajduje się w stanie splątany.

Procedura teleportacji kwantowej odbywa się w czterech krokach, które w przypadku teleportacji pojedynczego kubitu wyglądają następująco:

- (1) Nadawca i odbiorca otrzymują po jednej cząstce z pary, która znajduje się w stanie splątanym.
- (2) Nadawca poddaje układ złożony z otrzymanej cząstki w stanie splątanym i teleportowanej cząstki w nieznanym stanie paru prostym operacjom kwantowym i dokonuje pomiaru otrzymanego stanu końcowego.

Procedura teleportacji kwantowej odbywa się w czterech krokach, które w przypadku teleportacji pojedynczego kubitu wyglądają następująco:

- (1) Nadawca i odbiorca otrzymują po jednej cząstce z pary, która znajduje się w stanie splątanym.
- (2) Nadawca poddaje układ złożony z otrzymanej cząstki w stanie splątanym i teleportowanej cząstki w nieznanym stanie paru prostym operacjom kwantowym i dokonuje pomiaru otrzymanego stanu końcowego.
- (3) Nadawca wysyła odbiorcy wynik pomiaru **za pośrednictwem klasycznego kanału przekazu informacji**.

Procedura teleportacji kwantowej odbywa się w czterech krokach, które w przypadku teleportacji pojedynczego kubitu wyglądają następująco:

- (1) Nadawca i odbiorca otrzymują po jednej cząstce z pary, która znajduje się w stanie splątanym.
- (2) Nadawca poddaje układ złożony z otrzymanej cząstki w stanie splątanym i teleportowanej cząstki w nieznanym stanie parę prostym operacjom kwantowym i dokonuje pomiaru otrzymanego stanu końcowego.
- (3) Nadawca wysyła odbiorcy wynik pomiaru **za pośrednictwem klasycznego kanału przekazu informacji**.
- (4) W zależności od otrzymanego wyniku odbiorca wykonuje odpowiednią transformację unitarną stanu splątanego posiadanej przez niego cząstki.

W wyniku tej procedury zostaje zrealizowana teleportacja kwantowa w tym sensie, że **stan końcowy cząstki odbiorcy staje się identyczny ze stanem początkowym cząstki nadawcy.**

W wyniku tej procedury zostaje zrealizowana teleportacja kwantowa w tym sensie, że **stan końcowy cząstki odbiorcy staje się identyczny ze stanem początkowym cząstki nadawcy**. Natomiast stan początkowy cząstki będącej w posiadaniu nadawcy ulega nieodwracalnemu zniszczeniu.

W wyniku tej procedury zostaje zrealizowana teleportacja kwantowa w tym sensie, że **stan końcowy cząstki odbiorcy staje się identyczny ze stanem początkowym cząstki nadawcy**. Natomiast stan początkowy cząstki będącej w posiadaniu nadawcy ulega nieodwracalnemu zniszczeniu. A zatem teleportacja nie jest kopiowaniem (klonowaniem) kubitów.

Teleportacja pojedynczego kubit

Zajmiemy się procedurą teleportacji pojedynczego kubit.

Zajmiemy się procedurą teleportacji pojedynczego kubitów.
Nadawca (Alicja, A) i odbiorca (Bartek, B) wytwarzają
wspólnie splątany dwukubitowy stan kwantowy.

Zajmiemy się procedurą teleportacji pojedynczego kubitów. Nadawca (Alicja, A) i odbiorca (Bartek, B) wytwarzają wspólnie splątany dwukubitowy stan kwantowy. Następnie dzielą się pojedynczymi kubitami,

Zajmiemy się procedurą teleportacji pojedynczego kubit. Nadawca (Alicja, A) i odbiorca (Bartek, B) wytwarzają wspólnie splątany dwukubitowy stan kwantowy. Następnie dzielą się pojedynczymi kubitami, przy czym A zabiera pierwszy kubit, a B – drugi kubit.

Zajmiemy się procedurą teleportacji pojedynczego kubit. Nadawca (Alicja, A) i odbiorca (Bartek, B) wytwarzają wspólnie splątany dwukubitowy stan kwantowy. Następnie dzielą się pojedynczymi kubitami, przy czym A zabiera pierwszy kubit, a B – drugi kubit. Po rozdzieleniu się A i B przebywają w dużej odległości od siebie (znacznie większej niż zasięg oddziaływania między cząstkami).

Przyjmijmy, że pierwotnie wytworzony stan splątany jest stanem Bella $|\beta_{00}\rangle$, który zapisujemy w postaci

Przyjmijmy, że pierwotnie wytworzony stan splątany jest stanem Bella $|\beta_{00}\rangle$, który zapisujemy w postaci

$$|\beta_{00}\rangle = \frac{|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

Przyjmijmy, że pierwotnie wytworzony stan splątany jest stanem Bella $|\beta_{00}\rangle$, który zapisujemy w postaci

$$|\beta_{00}\rangle = \frac{|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

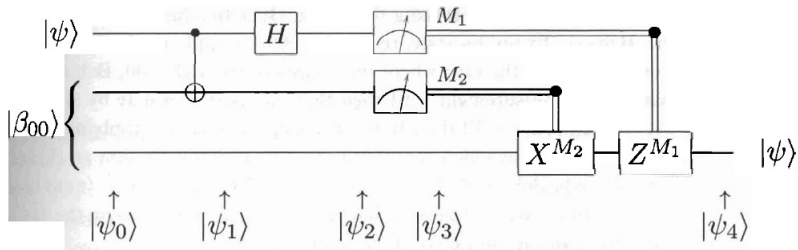
gdzie wskaźniki A i B oznaczają kubity należące odpowiednio do Alicji i Bartka.

Alicja podejmuje się następującego zadania:

Alicja podejmuje się następującego zadania: ma przekazać Bartkowi **nieznany jej kubit** $|\psi\rangle$ za pośrednictwem **wyłącznie klasycznego kanału przekazu informacji**.

Alicja podejmuje się następującego zadania: ma przekazać Bartkowi **nieznany jej kubit** $|\psi\rangle$ za pośrednictwem **wyłącznie klasycznego kanału przekazu informacji**. Obwód kwantowy do teleportacji kubitów pokazany jest na rysunku 8.1.

Alicja podejmuje się następującego zadania: ma przekazać Bartkowi **nieznany jej kubit** $|\psi\rangle$ za pośrednictwem **wyłącznie klasycznego kanału przekazu informacji**. Obwód kwantowy do teleportacji kubitów pokazany jest na rysunku 8.1.



Rysunek: 8.1. Obwód kwantowy do teleportacji kubitów.

Kubit, który ma przekazać Alicja ma postać

Kubit, który ma przekazać Alicja ma postać

$$|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle, \quad (2)$$

przy czym amplitudy a_0 i a_1 nie są znane.

Kubit, który ma przekazać Alicja ma postać

$$|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle, \quad (2)$$

przy czym amplitudy a_0 i a_1 nie są znane. Alicja tworzy następujący stan na wejściu obwodu kwantowego

Kubit, który ma przekazać Alicja ma postać

$$|\psi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle, \quad (2)$$

przy czym amplitudy a_0 i a_1 nie są znane. Alicja tworzy następujący stan na wejściu obwodu kwantowego

$$|\psi_0\rangle = |\psi\rangle|\beta_{00}\rangle. \quad (3)$$

Rozpisujemy stan wejściowy (3)

Rozpisujemy stan wejściowy (3)

$$|\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [a_0|0\rangle_A(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) + a_1|1\rangle_A(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B)] . \quad (4)$$

Alicja działa na swoje kubity bramką CNOT i otrzymuje stan

Alicja działa na swoje kubity bramką CNOT i otrzymuje stan

$$|\psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [a_0|0\rangle_A(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) + a_1|1\rangle_A(|1\rangle_A|0\rangle_B + |0\rangle_A|1\rangle_B)] . \quad (5)$$

Następnie Alicja działa na swój pierwszy kubit bramką Hadamarda i otrzymuje

Następnie Alicja działa na swój pierwszy kubit bramką Hadamarda i otrzymuje

$$|\psi_2\rangle = \frac{1}{2} [a_0(|0\rangle_A + |1\rangle_A)(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) + a_1(|0\rangle_A - |1\rangle_A)(|1\rangle_A|0\rangle_B + |0\rangle_A|1\rangle_B)] . \quad (6)$$

Stan (6) przepisujemy przegrupowując wyrazy

Stan (6) przepisujemy przegrupowując wyrazy

$$\begin{aligned} |\psi_2\rangle = & \frac{1}{2} [|0\rangle_A |0\rangle_A (a_0 |0\rangle_B + a_1 |1\rangle_B) \\ & + |0\rangle_A |1\rangle_A (a_0 |1\rangle_B + a_1 |0\rangle_B) \\ & + |1\rangle_A |0\rangle_A (a_0 |0\rangle_B - a_1 |1\rangle_B) \\ & + |1\rangle_A |1\rangle_A (a_0 |1\rangle_B - a_1 |0\rangle_B)] . \end{aligned} \quad (7)$$

Stan wynikowy (7) jest superpozycją czterech stanów, które występują z równymi prawdopodobieństwami.

Stan wynikowy (7) jest superpozycją czterech stanów, które występują z równymi prawdopodobieństwami.

Pytanie: Jakie to są prawdopodobieństwa?

Stan wynikowy (7) jest superpozycją czterech stanów, które występują z równymi prawdopodobieństwami.

Pytanie: Jakie to są prawdopodobieństwa?

Przeanalizujemy teraz zawartość informacyjną stanu końcowego (7).

Stan wynikowy (7) jest superpozycją czterech stanów, które występują z równymi prawdopodobieństwami.

Pytanie: Jakie to są prawdopodobieństwa?

Przeanalizujemy teraz zawartość informacyjną stanu końcowego (7).

Pierwszy wyraz w kombinacji liniowej (7) oznacza, że kubity Alicji są w stanie $|0\rangle_A|0\rangle_A$, a kubit Bartka jest w stanie $a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B$, który jest identyczny z oryginalnym teleportowanym stanem $|\psi\rangle$.

Stan wynikowy (7) jest superpozycją czterech stanów, które występują z równymi prawdopodobieństwami.

Pytanie: Jakie to są prawdopodobieństwa?

Przeanalizujemy teraz zawartość informacyjną stanu końcowego (7).

Pierwszy wyraz w kombinacji liniowej (7) oznacza, że kubity Alicji są w stanie $|0\rangle_A|0\rangle_A$, a kubit Bartka jest w stanie $a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B$, który jest identyczny z oryginalnym teleportowanym stanem $|\psi\rangle$.

Jeżeli Alicja wykona pomiar i otrzyma w wyniku stan $|0\rangle_A|0\rangle_A$, to kubit Bartka znajdzie się na pewno w stanie $|\psi\rangle$.

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitów Bartka.

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitu Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitu Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$|00\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(00)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B, \quad (8)$$

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitów Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$|00\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(00)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B, \quad (8)$$

$$|01\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(01)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B + a_1|0\rangle_B, \quad (9)$$

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitów Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$|00\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(00)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B, \quad (8)$$

$$|01\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(01)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B + a_1|0\rangle_B, \quad (9)$$

$$|10\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(10)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B - a_1|1\rangle_B, \quad (10)$$

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitu Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$|00\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(00)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B, \quad (8)$$

$$|01\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(01)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B + a_1|0\rangle_B, \quad (9)$$

$$|10\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(10)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B - a_1|1\rangle_B, \quad (10)$$

$$|11\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(11)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B - a_1|0\rangle_B, \quad (11)$$

Podobnie, znając wyniki pomiarów Alicji i korzystając z wyrażenia (7), będziemy mogli jednoznacznie zidentyfikować pozostałe trzy stany kubitu Bartka.

Wszystkie te wyniki można przedstawić za pomocą następujących wzorów:

$$|00\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(00)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B + a_1|1\rangle_B, \quad (8)$$

$$|01\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(01)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B + a_1|0\rangle_B, \quad (9)$$

$$|10\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(10)\rangle_B^f = a_0|0\rangle_B - a_1|1\rangle_B, \quad (10)$$

$$|11\rangle_A^f \longrightarrow |\psi(11)\rangle_B^f = a_0|1\rangle_B - a_1|0\rangle_B, \quad (11)$$

gdzie wskaźnik f oznacza kubit końcowy Alicji (A) i Bartka (B).

W zależności od wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję, kubit Bartka znajdzie się w jednym z czterech możliwych stanów końcowych (8), (9), (10), lub (11).

W zależności od wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję, kubit Bartka znajdzie się w jednym z czterech możliwych stanów końcowych (8), (9), (10), lub (11). Informację o wyniku pomiaru Alicja przesyła Bartkowi za pośrednictwem **klasycznego kanału przekazu**.

W zależności od wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję, kubit Bartka znajdzie się w jednym z czterech możliwych stanów końcowych (8), (9), (10), lub (11). Informację o wyniku pomiaru Alicja przesyła Bartkowi za pośrednictwem **klasycznego kanału przekazu**. Znając tę informację Bartek może odtworzyć teleportowany stan $|\psi\rangle$.

W zależności od wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję, kubit Bartka znajdzie się w jednym z czterech możliwych stanów końcowych (8), (9), (10), lub (11). Informację o wyniku pomiaru Alicja przesyła Bartkowi za pośrednictwem **klasycznego kanału przekazu**. Znając tę informację Bartek może odtworzyć teleportowany stan $|\psi\rangle$.
Poniżej przedstawiam operacje, które powinien wykonać Bartek, aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.
- (2) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|01\rangle$ (9), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki X , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.
- (2) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|01\rangle$ (9), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki X , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (3) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|10\rangle$ (10), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.
- (2) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|01\rangle$ (9), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki X , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (3) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|10\rangle$ (10), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (4) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|11\rangle$ (11), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu po kolei bramek X i Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.
- (2) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|01\rangle$ (9), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki X , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (3) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|10\rangle$ (10), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (4) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|11\rangle$ (11), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu po kolei bramek X i Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

W każdym przypadku Bartek powinien zastosować operację $U_B = Z^{m_1} X^{m_2}$, przy – zgodnie z regułą mnożenia macierzy – operator po prawej działa pierwszy.

- (1) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|00\rangle$ (8), to stan Bartka jest stanem $|\psi\rangle$ i Bartek nie potrzebuje wykonywać żadnej operacji.
- (2) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|01\rangle$ (9), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki X , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (3) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|10\rangle$ (10), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu bramki Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.
- (4) Jeżeli Alicja otrzyma w wyniku pomiaru stan $|11\rangle$ (11), to Bartek musi poddać swój kubit działaniu po kolei bramek X i Z , aby otrzymać teleportowany kubit $|\psi\rangle$.

W każdym przypadku Bartek powinien zastosować operację $U_B = Z^{m_1} X^{m_2}$, przy – zgodnie z regułą mnożenia macierzy – operator po prawej działa pierwszy. Potęgi m_1 i m_2 przyjmują wartości 0, 1.

Wyniki te można podsumować stosując zapis macierzowy. W reprezentacji macierzowej stany końcowe Bartka [por. (8), (9), (10), (11)] mają postać

Wyniki te można podsumować stosując zapis macierzowy. W reprezentacji macierzowej stany końcowe Bartka [por. (8), (9), (10), (11)] mają postać

$$|\psi\rangle_B^f = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_1 \\ a_0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} a_0 \\ -a_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -a_1 \\ a_0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Natomiast transformacje unitarne pozwalające Bartkowi odtworzyć teleportowany kubit mają postać

Natomiast transformacje unitarne pozwalające Bartkowi odtworzyć teleportowany kubit mają postać

$$U_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Diskusja

- ▶ Procedura teleportacji jest połączeniem **operacji kwantowych** wykonywanych przez nadawcę (A) i odbiorcę (B) z **przesyłaniem informacji kanałem klasycznym**.

- ▶ Procedura teleportacji jest połączeniem **operacji kwantowych** wykonywanych przez nadawcę (A) i odbiorcę (B) z **przesyłaniem informacji kanałem klasycznym**.
- ▶ Procedura ta może być uogólniona do przesłania **dowolnego stanu n -kubitowego**.

- ▶ Procedura teleportacji jest połączeniem **operacji kwantowych** wykonywanych przez nadawcę (A) i odbiorcę (B) z **przesyłaniem informacji kanałem klasycznym**.
- ▶ Procedura ta może być uogólniona do przesłania **dowolnego stanu n -kubitowego**.
- ▶ Szybkość teleportacji **nie może przekraczać prędkości światła**, co wynika z użycia klasycznego kanału przesyłania informacji.

- ▶ Procedura teleportacji jest połączeniem **operacji kwantowych** wykonywanych przez nadawcę (A) i odbiorcę (B) z **przesyłaniem informacji kanałem klasycznym**.
- ▶ Procedura ta może być uogólniona do przesyłania **dowolnego stanu n -kubitowego**.
- ▶ Szybkość telepotacji **nie może przekraczać prędkości światła**, co wynika z użycia klasycznego kanału przesyłania informacji.
- ▶ Teleportacja kwantowa **nie narusza twierdzenia o zakazie klonowania kubitów**, ponieważ teleportowany kubit jest niszczoney w miejscu nadawcy, a odtwarzany w miejscu odbiorcy, a zatem w wyniku teleportacji nie powstaje kopia stanu kwantowego z zachowaniem stanu oryginalnego.

Teleportacja kwantowa została zrealizowana doświadczalnie.

Teleportacja kwantowa została zrealizowana doświadczalnie.
W 1997 roku w Innsbrucku[†] dokonano teleportacji stanu polaryzacji fotonu.

Teleportacja kwantowa została zrealizowana doświadczalnie.
W 1997 roku w Innsbrucku[†] dokonano teleportacji stanu polaryzacji fotonu.

[†]D. Boumeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, A. Zeilinger,
Nature 390 (1997) 575,