

# Modele obliczeń kwantowych

Jakub Zieliński

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Warszawska

## Notacja Diraca, "bra-ket"

Używana do opisu wektorów z tzw. przestrzeni Hilberta oraz przy korzystaniu z operatora sprzężenia hermitowskiego:  $|ket\rangle \longrightarrow \langle bra|$

gdzie  $|ket\rangle$  jest wektorem kolumnowym

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_{n-1} & \alpha_n \end{pmatrix}^T$$

$\langle bra|$  jest wektorem w postaci rzędu

$$\begin{pmatrix} \alpha_1^* & \alpha_2^* & \cdots & \alpha_{n-1}^* & \alpha_n^* \end{pmatrix}$$

## Podstawowe opercje

- 1 iloczyn skalarny  $\langle bra|ket\rangle$
- 2 rzutowanie na wektor  $|v_1\rangle\langle v_1|v_2\rangle$  (rzut  $v_2$  na  $v_1$ )
- 3 zapis wektora w bazie

$$|V\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i\rangle$$

## Przykład nr 1 - Rozkład w bazie

Wektor w bazie o wymiarze  $n = 3$  możemy zapisać w następujący sposób:

$$|\psi\rangle = \alpha|001\rangle + \beta|010\rangle + \gamma|100\rangle$$

$|001\rangle, |010\rangle, |100\rangle$  są wyłącznie etykietami.

## Przykład nr 2 - Rzutowanie

Weźmy wektor  $|V\rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i |v_i\rangle$

Rzutowmy wektor  $|V\rangle$  na ortonormalny wektor bazowy  $|v_1\rangle$ .

$$|v_1\rangle\langle v_1||V\rangle = \alpha_1|v_1\rangle \overbrace{\langle v_1|v_1\rangle}^1 + \alpha_2|v_1\rangle \overbrace{\langle v_1|v_2\rangle}^0 + \dots + \alpha_n|v_1\rangle \overbrace{\langle v_1|v_n\rangle}^0$$

Otrzymujemy  $|v_1\rangle\langle v_1|V\rangle = \alpha_1|v_1\rangle\langle v_1|v_1\rangle = \alpha_1|v_1\rangle$

## Opis matematyczny

Układ opisany dwuwymiarową przestrzenią Hilberta. Kubit jest superpozycją 2 podstawowych stanów własnych  $|0\rangle$  i  $|1\rangle$ .

$$|\psi_0\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Gdzie  $\|\alpha\|^2$  i  $\|\beta\|^2$  są prawdopodobieństwami wystąpienia odpowiednich stanów własnych oraz

$$\|\alpha\|^2 + \|\beta\|^2 = 1$$

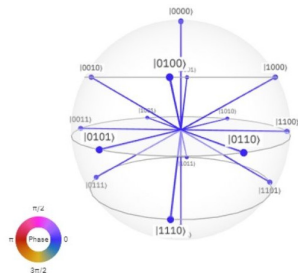
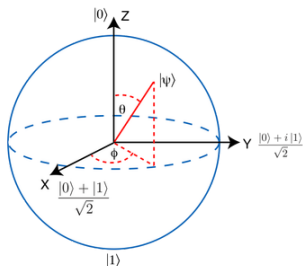
## Sfera Blocha

Kubit może być również opisany przy pomocy funkcji trygonometrycznych.

$$|\psi_0\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$$

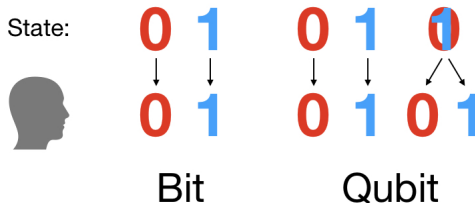
gdzie  $0 \leq \phi \leq \pi$  i  $0 \leq \theta \leq 2\pi$

Pozwala to na przedstawienie kubit jako sfery Blocha.



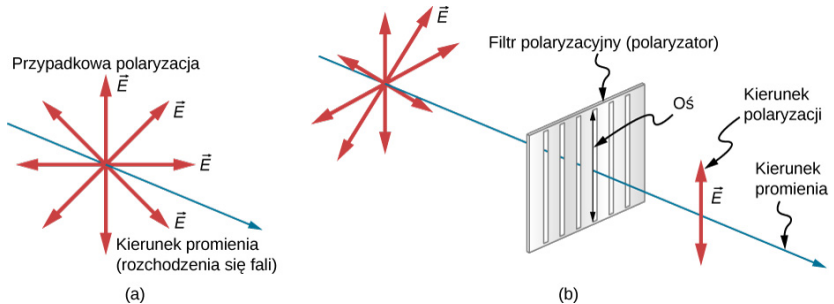
# Pomiar stanu kubitu

Na wynik pomiaru stanu kubitu wpływa jego opis w przestrzeni Hilberta, tzn. wartości współczynników  $\alpha$  i  $\beta$ . Co więcej, pomiar powoduje zmianę stanu układu. Następuje *collapse* i stan układu przyjmuje wartość pomiaru.  $np. |\phi\rangle \longrightarrow |1\rangle$



# Pomiar stanu kubit

Jeżeli jako fizyczny model naszego kubit użnamy foton, to pomiar stanu możemy sobie wyobrazić jako przepuszczenie przez polaryzator.



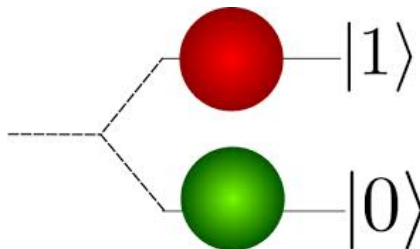


# Podstawowe operacje na kubitach

Zdefiniujmy wektory własne  $|0\rangle$  i  $|1\rangle$  odpowiednio jako  $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$  i  $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Łatwo sprawdzić, że wektory są ortonormalne, czyli

$$\langle 0|0\rangle = 1 \qquad \langle 1|1\rangle = 1 \qquad \langle 1|0\rangle = 0 \qquad \langle 0|1\rangle = 0$$



## Bramka Hadamarda

Jedno-kubitowa bramka oznaczana  $\hat{H}$ , opisana macierzą

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\hat{H}|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

$$\hat{H}|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$$



## Alternatywna baza

$\hat{H}|0\rangle$  oznaczamy przez  $|+\rangle$ , a  $\hat{H}|1\rangle$  przez  $|-\rangle$ .

$|+\rangle$  i  $|-\rangle$  są ortogonalne, więc również wyznaczają bazę.

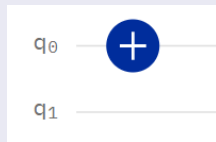
## Bramka NOT, $\hat{X}$

Bramka neguje stan kwantowy, podobnie jak klasyczny NOT.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

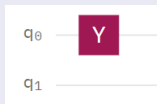
$$\hat{X}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$$

Warto zauważyć że  $\hat{X}\hat{X}$  jest macierzą  $I$ .



## Bramka $\hat{Y}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$



$$\hat{Y}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = -i\beta|0\rangle + i\alpha|1\rangle$$

$\hat{Y}\hat{Y}$  jest macierzą  $I$ .

## Bramka $\hat{Z}$

Bramka zmiany fazy o  $\pi$ .

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$



$$\hat{Z}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$$

$\hat{Z}\hat{Z}$  jest macierzą  $I$ .

Notacja Diraca opisuje też stany wielokubitowe.

## Iloczyn tensorowy

Przy jego pomocy można złożyć dwa stany w jeden wypadkowy.

$$|\psi_{AB}\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle = \begin{pmatrix} \alpha_A \\ \beta_A \end{pmatrix} \otimes |\psi_B\rangle = \begin{pmatrix} \alpha_A |\psi_B\rangle \\ \beta_A |\psi_B\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_A \alpha_B \\ \alpha_A \beta_B \\ \beta_A \alpha_B \\ \beta_A \beta_B \end{pmatrix}$$

## Stany dwukubitowe

Przy pomocy iloczynu tensorowego możemy wyznaczyć wektory reprezentujące stany własne układu.

$$|00\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |01\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |10\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |11\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## Bramka CNOT

Bramka dwukubitowa. Wyróżniamy kubit *control* i *target*.  
*Control* decyduje o negacji *target*.

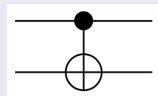
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{CNOT}|00\rangle = |00\rangle$$

$$\hat{CNOT}|01\rangle = |01\rangle$$

$$\hat{CNOT}|10\rangle = |11\rangle$$

$$\hat{CNOT}|11\rangle = |10\rangle$$



## Stan splątany

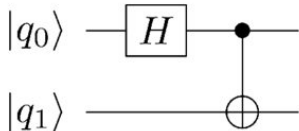
- 1 Stanu układu nie da się "rozsupłać".
- 2 Zmiana stanu jednego z kubitów wpływa na drugi.
- 3 Wystarczy zmierzyć jeden z kubitów, by poznać stan obu.



## Jak splątać kubity?

Przepuśćmy stan  $|00\rangle$  przez poniższy obwód kwantowy.

$$|00\rangle \xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle(|0\rangle + |1\rangle) \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$



## Wszystkie przypadki "wejścia"

$$\begin{aligned} |00\rangle &\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \\ |01\rangle &\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \\ |10\rangle &\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle) \\ |11\rangle &\longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle) \end{aligned}$$

## Stany Bell'a

Tworzą alternatywną bazę dla układów 2 kubitowych.

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$$

$$|\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

## Dowód splątania

$$|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)(\gamma|0\rangle + \delta|1\rangle) = \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle$$

Aby zachodziła równość,  $\alpha\gamma = \beta\delta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , a  $\alpha\delta = \beta\gamma = 0$

Ten warunek jest nie do spełnienia.

Analogicznie dla reszty przypadków.

## Cel procedury

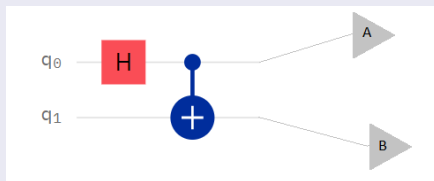
Zakodowanie dwu-bitowej informacji w jednym kubicie.

## Procedura

- 1 Przygotowanie splątanego układu
- 2 Kodowanie w A
- 3 Przesył kubitów z A do B
- 4 Dekodowanie w B

## Krok nr 1

Splątanie kubitów  $|0_A\rangle$  i  $|0_B\rangle$  w laboratorium i przekazanie ich do punktów A i B.



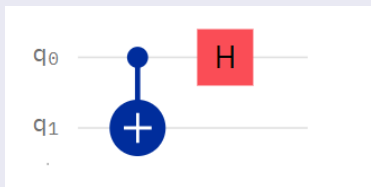
## Krok nr 2

W punkcie A wykonujemy jedną z 4 operacji. Które kodujemy klasycznie.

Informacja	Operacja	Stan układu
00	$\hat{I}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}( 00\rangle +  11\rangle)$
01	$\hat{X}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}( 10\rangle +  01\rangle)$
10	$\hat{Z}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}( 00\rangle -  11\rangle)$
11	$\hat{X}\hat{Z}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}( 01\rangle -  10\rangle)$

## Krok nr 3

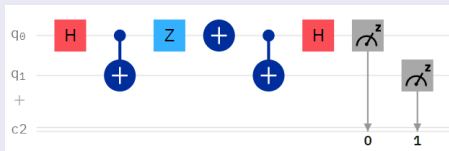
Przekazanie kubitów z A do B i wykonanie dekodowania obwodem odwrotnym do obwodu splątującego.



## Krok nr 4

Wykonanie pomiaru na kubitach w punkcie B.

Funkcja opisująca kubit jest postaci  $|AB\rangle$ , co daje 100% szansę na odczytanie zakodowanej wiadomości.



## Cel procedury

Transport informacji o kubicie, czyli jego stanu kwantowego, do wskazanego miejsca.

## Procedura

- 1 Umieszczenie splątanych kubitów w A i B.
- 2 Wykonanie pomiaru w bazie Bella, na kubitach z A.
- 3 Klasyczny transport informacji o wyniku pomiaru do B.
- 4 Dekodowanie kubit w B.

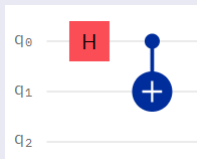


## Krok 1

Splątana parę kubitów rozdzielamy do punktów A i B.  
W punkcie A znajduje się również kubit  $|\psi\rangle$ , którego stan przeniesiemy do B.

Stan układu :

$$(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha|000\rangle + \alpha|011\rangle + \beta|100\rangle + \beta|111\rangle)$$



## Krok 2

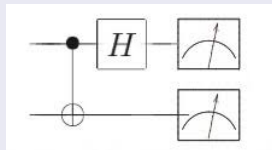
Przedstawmy stan 2 kubitów z A (2 pierwsze) w bazie Bell'a.

$$|00\rangle = |\phi^+\rangle + |\phi^-\rangle$$

$$|01\rangle = |\psi^+\rangle + |\psi^-\rangle$$

$$|10\rangle = |\psi^+\rangle - |\psi^-\rangle$$

$$|11\rangle = |\phi^+\rangle - |\phi^-\rangle$$

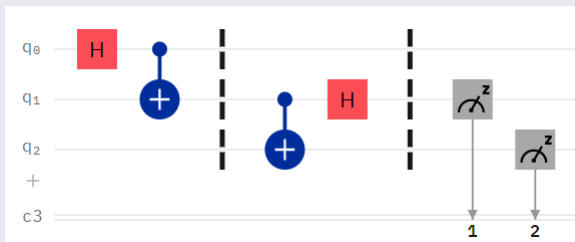


Przy pomocy powyższych zależności otrzymujemy:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 \left[ |\phi^+\rangle (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) + |\psi^+\rangle (\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle) + |\phi^-\rangle (\alpha|0\rangle - \beta|1\rangle) + |\psi^-\rangle (\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle) \right]$$

## Krok 3

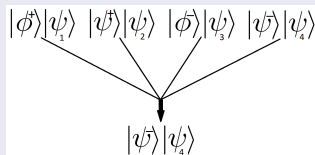
W zależności o wyniku pomiaru do B zostaje przekazana informacja o sposobie przywrócenia informacji o  $|\psi\rangle$  na kubicie pozostającym w B.



## Krok 4

Dzięki informacji z A, wiemy w jakim stanie jest układ po pomiarze. Na kubicie z B wykonujemy jedną z operacji:  $\hat{I}, \hat{X}, \hat{Z}, \hat{X}\hat{Z}$ .

Założmy, że pomiar w A dał wynik  $|\psi^-\rangle$ . Zachodzi *collapse* funkcji falowej do postaci:  $|\psi^-\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)$



# Protokoły kwantowe - kwantowa "teleportacja"

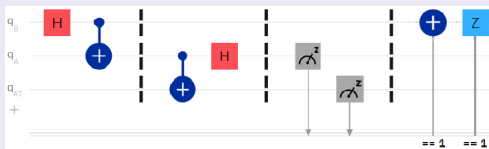
## Krok 4

Dzięki informacji z A, wiemy w jakim stanie jest układ po pomiarze. Na kubicie z B wykonujemy jedną z operacji:  $\hat{I}$ ,  $\hat{X}$ ,  $\hat{Z}$ ,  $\hat{X}\hat{Z}$ .

Zauważmy, że  $|\psi^-\rangle(\alpha|1\rangle - \beta|0\rangle)$  to nic innego jak  $\hat{Z}\hat{X}|\psi\rangle$ .

## Podsumowanie

Operacja  $\hat{X}\hat{Z}$   
ustawia stan  $|\psi\rangle$ ,  
tym samym kończąc  
protokół.



## Sformułowanie problemu

Istnieje funkcja postaci  $f : N \rightarrow \{0, 1\}$ , dana wzorem

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \neq x_s \\ 1, & x = x_s \end{cases}$$

Chcemy poznać wartość  $x_s$ .

## Podójście klasyczne

Iterujemy po wszystkich moŹliwych wartořciach  $x$   
i sprawdzamy czy  $f(x_i)$  jest równe 1.

Złożoność oczywiście :  $O(N)$



## Podejście "kwantowe"

Algorytm bazuje na iteracyjnym "wzmacnianiu amplitudy" prawdopodobieństwa szukanego stanu  $|x_s\rangle$ . Proces osiągamy poprzez odpowiednie manipulowanie rejestrem kwantowym.

- 1 Przygotowanie rejestru
- 2 "Oracle" wskazuje szukany element
- 2 Wzmacniamy amplitudę szukanego elementu
- 3 Pomiar



# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera

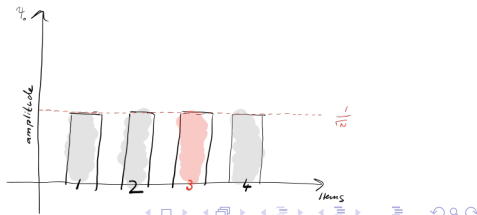
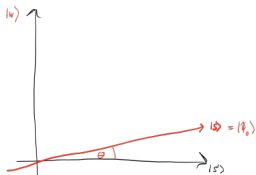
## Krok 1 - Przygotowanie rejestru

Niech rejestr kwantowy będzie dany funkcją falową :

$$|\phi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1}^{N-1} |\omega_i\rangle$$

gdzie  $N = 2^n$ , a  $n$  to ilość kubitów.

Wybieramy taką postać wejściową, ponieważ nie faworyzuje żadnego ze stanów bazowych.



## Krok 2 - Manipulacje na rejestrze

Korzystamy z dwóch operacji (bramek). Nazwijmy je  $\mathcal{A}$  i  $\mathcal{B}$ .

Po każdej iteracji stan rejestru to:

$$|\phi_{n+1}\rangle = \mathcal{B}\mathcal{A}|\phi_n\rangle$$

gdzie:

$$\mathcal{A} = \mathcal{I} - 2|\omega_0\rangle\langle\omega_0|$$

$$\mathcal{B} = 2|\phi_0\rangle\langle\phi_0| - \mathcal{I}$$

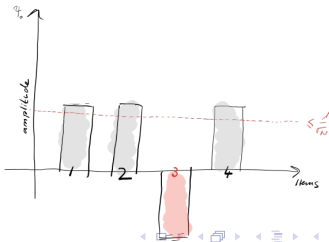
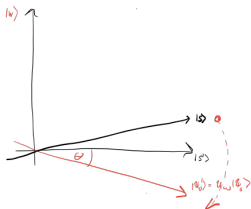
Powtarzamy odpowiednią ilość razy.

## Operacja $\mathcal{A}$ - "oracle"

Działanie operatora  $\mathcal{A}$  na stan bazowy  $|\omega_i\rangle$ :

$$\mathcal{A}|\omega_i\rangle = (\mathcal{I} - 2|\omega_0\rangle\langle\omega_0|)|\omega_i\rangle = |\omega_i\rangle - 2|\omega_0\rangle \cdot \begin{cases} 0, & \omega_i \neq \omega_0 \\ 1, & \omega_i = \omega_0 \end{cases}$$

$$\mathcal{A}|\omega_i\rangle = \begin{cases} |\omega_i\rangle, & \omega_i \neq \omega_0 \\ -|\omega_i\rangle, & \omega_i = \omega_0 \end{cases}$$

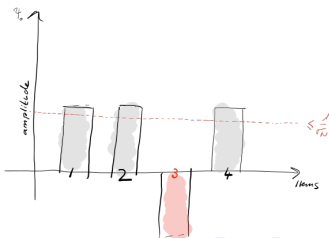
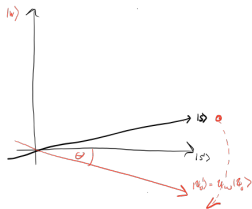


# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera

## Operacja $\mathcal{A}$ - "oracle"

Działanie operatora  $\mathcal{A}$  na rejestr kwantowy:

$$\mathcal{A}|\phi\rangle = \mathcal{A}\left(\sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega} |\omega\rangle\right) = -\alpha_{\omega_0} |\omega_0\rangle + \sum_{\substack{\omega=0 \\ \omega \neq \omega_0}}^{N-1} \alpha_{\omega} |\omega\rangle$$

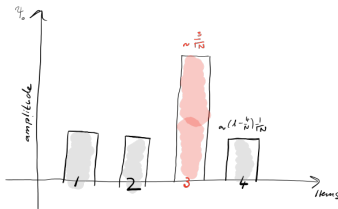
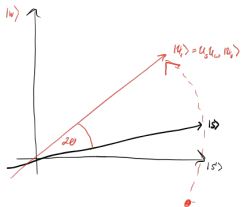


## Operacja $\mathcal{B}$

Działanie operatora  $\mathcal{B}$  na stan bazowy  $|\omega_i\rangle$ :

$$\mathcal{B}|\omega_i\rangle = (2|\phi_0\rangle\langle\phi_0| - \mathcal{I})|\omega_i\rangle = 2|\phi_0\rangle \underbrace{\langle\phi_0|\omega_i\rangle}_{=\frac{1}{\sqrt{N}}} - |\omega_i\rangle = \frac{2}{\sqrt{N}}|\phi_0\rangle - |\omega_i\rangle$$

$$\langle\phi_0|\omega_i\rangle = \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \quad \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \cdots \quad \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \frac{1}{\sqrt{N}}\right) \cdot (0 \quad 1 \quad \cdots \quad 0 \quad 0)^T = \frac{1}{\sqrt{N}}$$



## Operacja $\mathcal{B}$

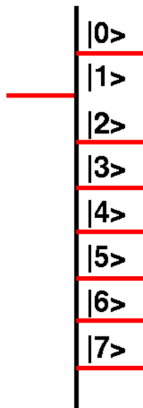
Działanie operatora  $\mathcal{B}$  na rejestr kwantowy:

$$\begin{aligned}\mathcal{B}|\phi\rangle &= \mathcal{B}\left(\sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}|\omega\rangle\right) = \sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}\left(\frac{2}{\sqrt{N}}|\phi_0\rangle - |\omega\rangle\right) \\&= \frac{2}{\sqrt{N}} \sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}\left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{\omega=0}^{N-1} |\omega\rangle\right) - \sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}|\omega\rangle \\&= 2 \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}}_{\alpha_{avg}} \sum_{\omega=0}^{N-1} |\omega\rangle - \sum_{\omega=0}^{N-1} \alpha_{\omega}|\omega\rangle \\&= \sum_{\omega=0}^{N-1} (2\alpha_{avg} - \alpha_{\omega})|\omega\rangle = \sum_{\omega=0}^{N-1} \left(\alpha_{avg} + (\alpha_{avg} - \alpha_{\omega})\right)|\omega\rangle\end{aligned}$$

# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera

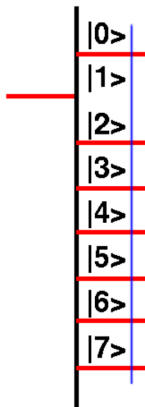
$|0\rangle$   
 $|1\rangle$   
 $|2\rangle$   
 $|3\rangle$   
 $|4\rangle$   
 $|5\rangle$   
 $|6\rangle$   
 $|7\rangle$

# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera





# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera



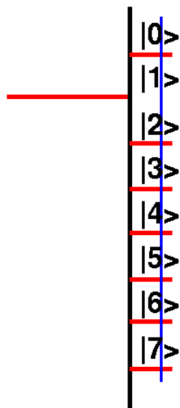
# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera



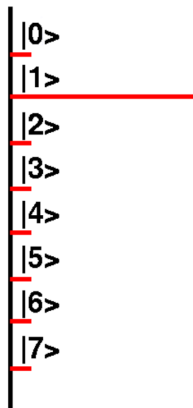
# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera



# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera



# Algorytmy kwantowe - Algorytm Grovera

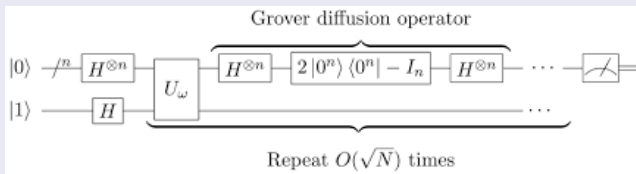


## Podsumowanie i implementacja

Ilość operacji  $\mathcal{BA}$  to:  $\lfloor \frac{\pi}{4} \sqrt{N} - \frac{1}{2} \rfloor \implies O(\sqrt{N})$

Po wykonanych operacjach algorytm kończy się pomiarem.

Prawdopodobieństwo sukcesu  $P(\checkmark) \approx 1 - \frac{1}{N}$



# Praktyczne zastosowanie

Jeżeli przygotujemy "Oracle", który będzie miał do danych recordu, naturalnym jest użycie algorytmu przy obsłudze baz danych.



## Pros:

- 1 Osiągnięcie kwantowego przyspieszenia
- 2 Bardzo użyteczne dla IoT

## Cons:

- 1 Kosztowny "Oracle" :  $O(N)$
- 2 Zmiana elementu szukanego  $\rightarrow$  nowy "Oracle"
- 3 Rozmiar układu rośnie wraz z  $N$
- 4 Trzeba być **niezłym** fizykiem



- ❶ skrypt "kubity.pdf", dr inż. Tomasz Gradowski
- ❷ nagrania YT "Wszechnica CFT PAN: Części 1-12", mgr K. Kowalczyk-Muryńska
- ❸ Wikipedia
- ❹ "Algorytm Grovera", dr Robert Nowotniak
- ❺ IBM Quantum Experience
- ❻ Qiskit - Quantum teleportation

Dziękuję za uwagę.  
Proszę o **proste** pytania.