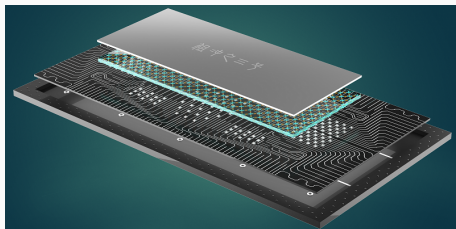


Część 3: urządzenia informatyki kwantowej na bazie nadprzewodników

Tadeusz DOMAŃSKI

UMCS Lublin



Odolanów

3 lipca 2025

1. Preliminaria

(kwantowe bity, kwantowe bramki logiczne)

2. Qubity na bazie nadprzewodników

(kontrolowane potencjałem lub indukcyjnością)

3. Perspektywa nadprzewodników topologicznych

(protekcja topologiczna, obliczenia kwantowe)

Preliminaria

KLASYCZNY BIT $\longleftrightarrow$ KWANTOWY BIT

$\Rightarrow$ Konwencjonalny zapis/odczyt danych w komputerach odbywa się w systemie binarnym, korzystając z bitów: 0, 1

KLASYCZNY BIT $\longleftrightarrow$ KWANTOWY BIT

$\Rightarrow$ Konwencjonalny zapis/odczyt danych w komputerach odbywa się w systemie binarnym, korzystając z bitów: 0, 1

$\Rightarrow$ Funkcjonowanie komputerów kwantowych opiera się na kwantowych odpowiednikach, zdefiniowanych jako:

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

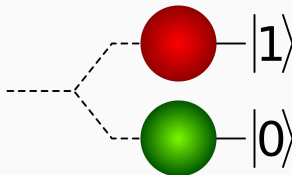
KLASYCZNY BIT $\longleftrightarrow$ KWANTOWY BIT

$\Rightarrow$ Konwencjonalny zapis/odczyt danych w komputerach odbywa się w systemie binarnym, korzystając z bitów: 0, 1

$\Rightarrow$ Funkcjonowanie komputerów kwantowych opiera się na kwantowych odpowiednikach, zdefiniowanych jako:

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

$\Rightarrow$ realizowalnych w układzie dwóch stanów kwantowych

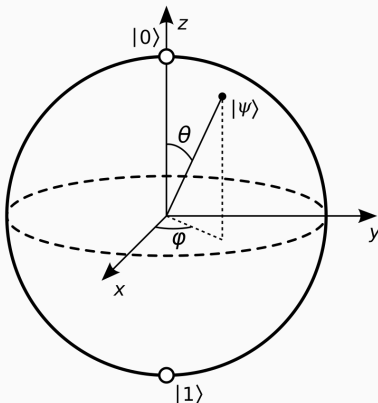


QUBIT: KWANTOWA SUPERPOZYCJA STANÓW

Kwantowy bit (ang. *qubit*) jest superpozycją dwóch stanów

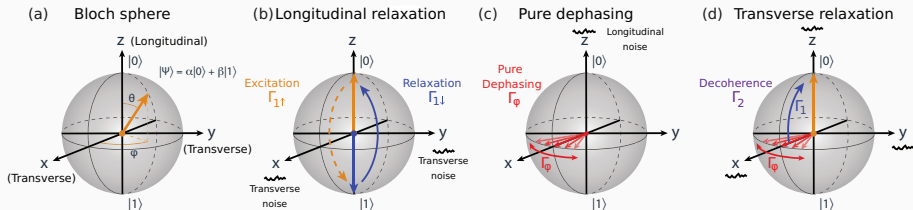
$$\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \equiv |\psi\rangle$$

o współczynnikach $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, które można zilustrować jako składowe wektora tworzącego sferę Blocha



WPŁYW OTOCZENIA NA QUBITY

Pod wpływem czynników zewnętrznych mogą zachodzić następujące typy procesów:



**b) podłużna relaksacja,
c) defazowanie,
d) poprzeczna relaksacja.**

KONWENCJONALNE BRAMKI LOGICZNE

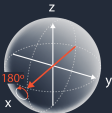
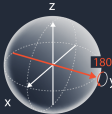
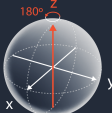
GATE	CIRCUIT SYMBOL	TRUTH TABLE	
NOT The output is 1 when the input is 0 and 0 when the input is 1.		Input	Output
		0	1
		1	0
AND The output is 1 only when both inputs are 1, otherwise the output is 0.		Input	Output
		0 0	0
		0 1	0
		1 0	0
		1 1	1
OR The output is 0 only when both inputs are 0, otherwise the output is 1.		Input	Output
		0 0	0
		0 1	1
		1 0	1
		1 1	1
NAND The output is 0 only when both inputs are 1, otherwise the output is 1.		Input	Output
		0 0	1
		0 1	1
		1 0	1
		1 1	0

NOR The output is 1 only when both inputs are 0, otherwise the output is 0.		Input	Output
		0 0	1
		0 1	0
		1 0	0
		1 1	0
XOR The output is 1 only when the two inputs have different value, otherwise the output is 0.		Input	Output
		0 0	0
		0 1	1
		1 0	1
		1 1	0
XNOR The output is 1 only when the two inputs have the same value, otherwise the output is 0.		Input	Output
		0 0	1
		0 1	0
		1 0	0
		1 1	1

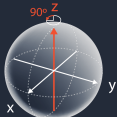
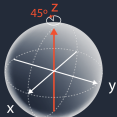
P. Krantz et al,

Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019).

KWANTOWE BRAMKI LOGICZNE: CZ. 1

GATE	CIRCUIT REPRESENTATION	MATRIX REPRESENTATION	TRUTH TABLE	BLOCH SPHERE						
I Identity-gate: no rotation is performed.		$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$1\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$									
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$									
X gate: rotates the qubit state by π radians (180°) about the x-axis.		$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$1\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$									
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$									
Y gate: rotates the qubit state by π radians (180°) about the y-axis.		$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$i 1\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$-i 0\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$i 1\rangle$	$ 1\rangle$	$-i 0\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$i 1\rangle$									
$ 1\rangle$	$-i 0\rangle$									
Z gate: rotates the qubit state by π radians (180°) about the z-axis.		$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$- 1\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$- 1\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$									
$ 1\rangle$	$- 1\rangle$									

KWANTOWE BRAMKI LOGICZNE: CZ. 2

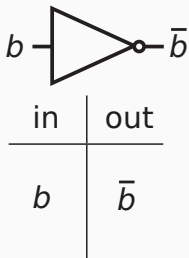
S gate: rotates the qubit state by $\frac{\pi}{2}$ radians (90°) about the z-axis.		$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$e^{i\frac{\pi}{2}} 1\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$e^{i\frac{\pi}{2}} 1\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$									
$ 1\rangle$	$e^{i\frac{\pi}{2}} 1\rangle$									
T gate: rotates the qubit state by $\frac{\pi}{4}$ radians (45°) about the z-axis.		$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$e^{i\frac{\pi}{4}} 1\rangle$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$e^{i\frac{\pi}{4}} 1\rangle$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$									
$ 1\rangle$	$e^{i\frac{\pi}{4}} 1\rangle$									
H gate: rotates the qubit state by π radians (180°) about an axis diagonal in the x-z plane. This is equivalent to an X-gate followed by a $\frac{\pi}{2}$ rotation about the y-axis.		$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	<table><tr><th>Input</th><th>Output</th></tr><tr><td>$0\rangle$</td><td>$\frac{ 0\rangle + 1\rangle}{\sqrt{2}}$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$\frac{ 0\rangle - 1\rangle}{\sqrt{2}}$</td></tr></table>	Input	Output	$ 0\rangle$	$\frac{ 0\rangle + 1\rangle}{\sqrt{2}}$	$ 1\rangle$	$\frac{ 0\rangle - 1\rangle}{\sqrt{2}}$	
Input	Output									
$ 0\rangle$	$\frac{ 0\rangle + 1\rangle}{\sqrt{2}}$									
$ 1\rangle$	$\frac{ 0\rangle - 1\rangle}{\sqrt{2}}$									

P. Krantz et al, Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019).

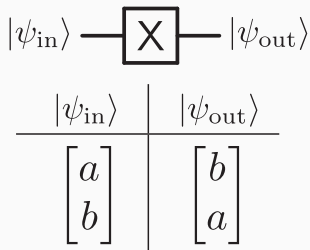
PRZYKŁAD: BRAMKA INWERSJI

Porównanie klasycznej bramki NOT z kwantową bramką X

(a) Classical NOT gate



(b) Quantum X gate



P. Krantz et al, Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019).

PRZYKŁADY QUBITÓW

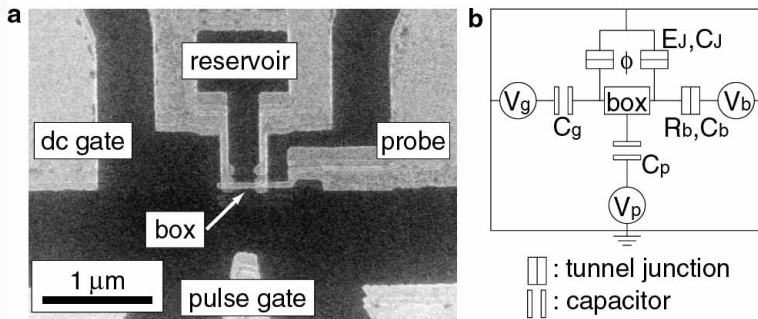
Dotychczasowe realizacje qubitów uzyskano w oparciu o stany kwantowe:

- fotonów,
- momentów magnetycznych w nukleonach,
- atomów w pułapkach,
- kropek kwantowych,
- **złączy Josephsona,**
- **materiałów topologicznych,**
- **struktur van der Waalsa.**

Qubity nadprzewodzące

PIERWSZY QUBIT Z NADPRZEWODNIKA

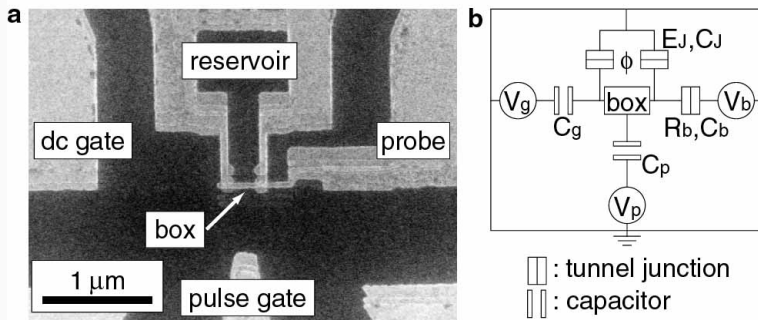
Pierwszą realizację qubitu na bazie nadprzewodnika w 1999 roku przeprowadziła grupa japońska kierowana przez Y. Nakumurę



Y. Nakamura, Y.A. Pashkin, J.S. Tsai, *Nature* **398**, 786 (1999).

PIERWSZY QUBIT Z NADPRZEWODNIKA

Pierwszą realizację qubitu na bazie nadprzewodnika w 1999 roku przeprowadziła grupa japońska kierowana przez Y. Nakumurę

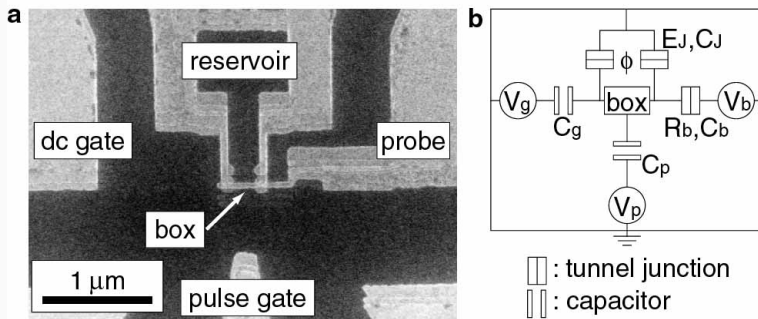


Y. Nakamura, Y.A. Pashkin, J.S. Tsai, Nature **398**, 786 (1999).

⇒ dwu-poziomowy układ na bazie złącza Josephaona

PIERWSZY QUBIT Z NADPRZEWODNIKA

Pierwszą realizację qubitu na bazie nadprzewodnika w 1999 roku przeprowadziła grupa japońska kierowana przez Y. Nakumurę



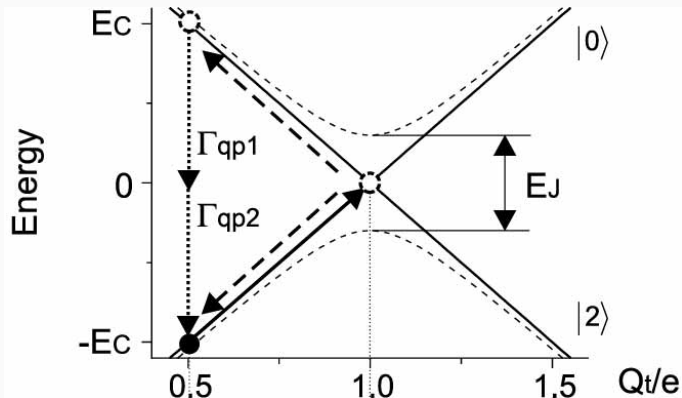
Y. Nakamura, Y.A. Pashkin, J.S. Tsai, Nature 398, 786 (1999).

⇒ dwu-poziomowy układ na bazie złącza Josephsona

⇒ do kontroli stanu użyto potencjału bramki (ang. **gate**)

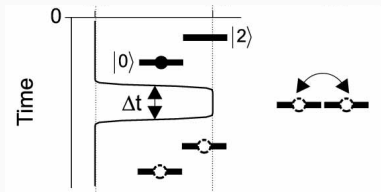
GATEMON: ZARYS KONCEPCJI

Do konstrukcji stanów kwantowych wykorzystano rezerwuar par Coopera (ang. *Cooper pair box*). Odległość dwóch poziomów kontrolowano potencjałem bramki (stąd nazwa **gatemom**).



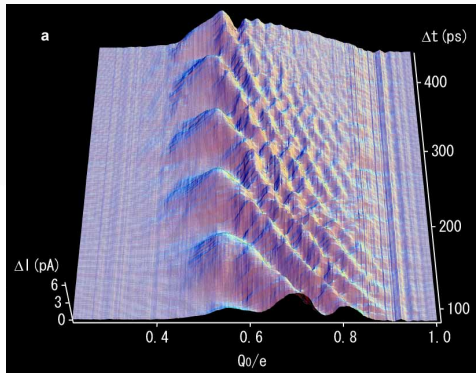
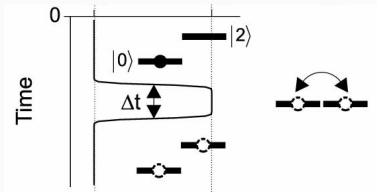
GATEMON: EWOLUCJA STANÓW

Za pomocą krótkiego impulsu potencjału zbadano koherentną ewolucję zaindukowaną przejściem: $|0\rangle \longrightarrow \alpha(t) |0\rangle + \beta(t) |2\rangle$



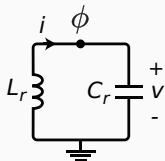
GATEMON: EWOLUCJA STANÓW

Za pomocą krótkiego impulsu potencjału zbadano koherentną ewolucję zaindukowaną przejściem: $|0\rangle \longrightarrow \alpha(t) |0\rangle + \beta(t) |2\rangle$

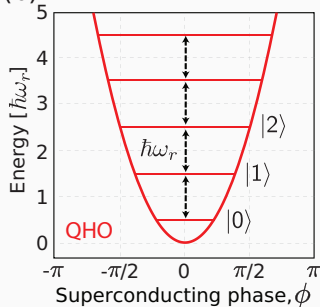


POZIOMY ENERGETYCZNE QUBITU

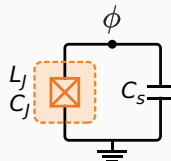
(a)



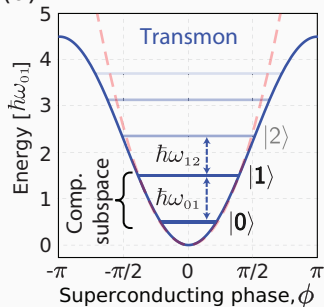
(b)



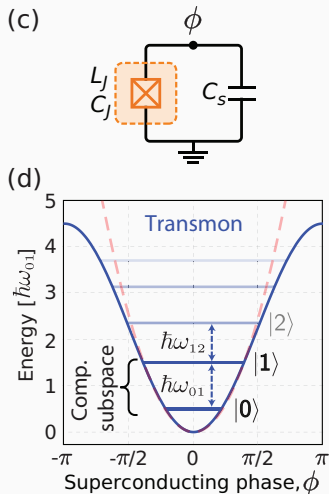
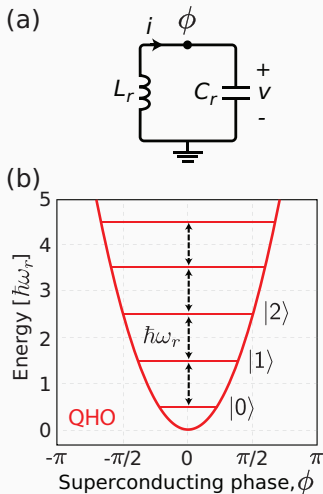
(c)



(d)

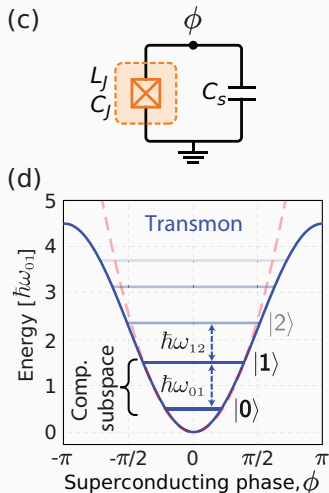
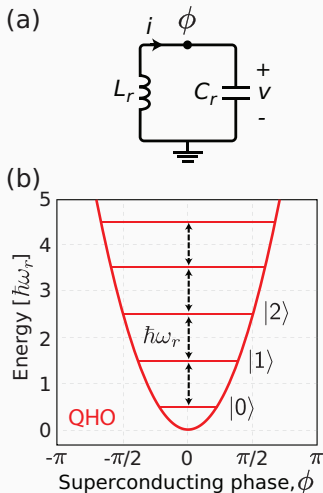


POZIOMY ENERGETYCZNE QUBITU



a-b) schemat i poziomy energetyczne zwykłego oscylatora LC

POZIOMY ENERGETYCZNE QUBITU

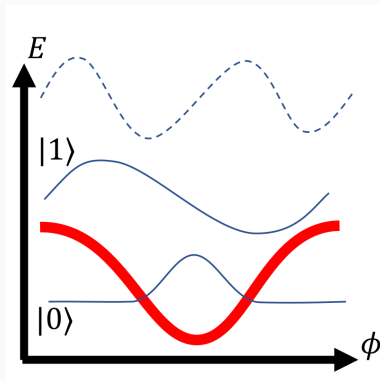
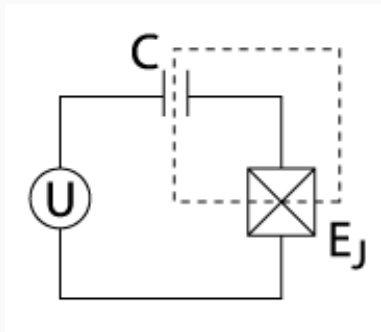


a-b) schemat i poziomy energetyczne zwykłego oscylatora LC

c-d) schemat oraz poziomy obwodu ze złączem Josephsona

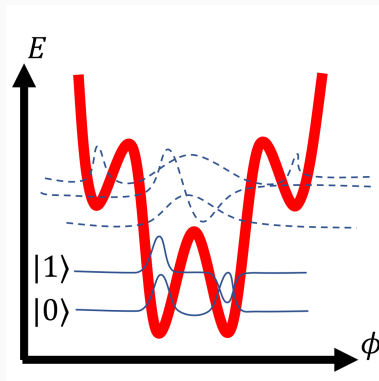
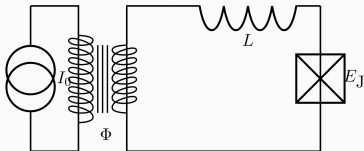
Realizowano różne typy qubitów nadprzewodzących ...

1. CHARGE QUBIT



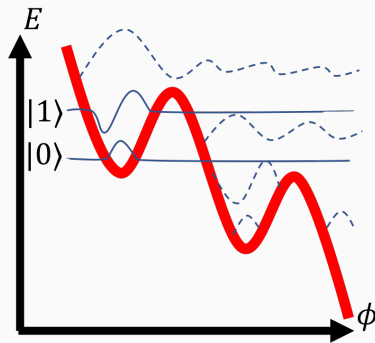
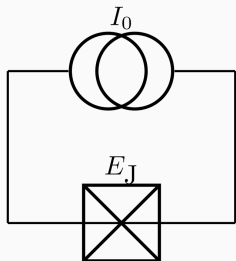
Schemat układu oraz kształt funkcji falowych najniższych stanów.

2. FLUX QUBIT



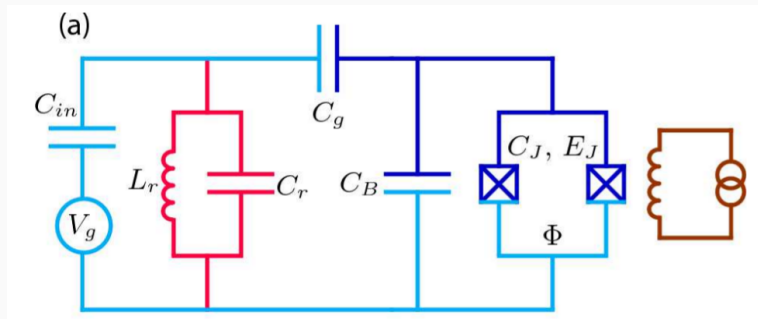
Schemat układu oraz kształt funkcji falowych najniższych stanów.

3. PHASE QUBIT



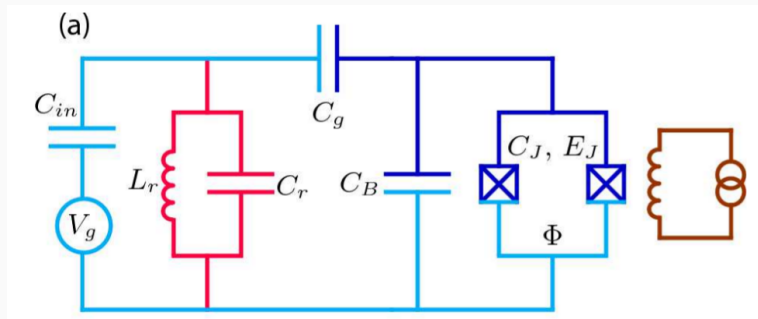
Schemat układu oraz kształt funkcji falowych najniższych stanów.

Wersję qubitu nadprzewodzącego niewiele narażoną na wpływ szumu ładunkowego zaproponowała grupa z Yale University



J. Koch et al, Phys. Rev. A 76, 042319 (2007).

Wersję qubitu nadprzewodzącego niewiele narażoną na wpływ szumu ładunkowego zaproponowała grupa z Yale University

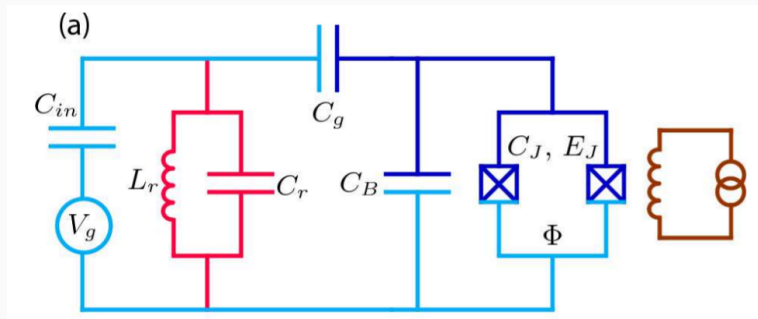


J. Koch et al, Phys. Rev. A 76, 042319 (2007).

⇒ dwa obszary nadprzewodnika w konfiguracji Josephsona

TRANSMON

Wersję qubitu nadprzewodzącego niewiele narażoną na wpływ szumu ładunkowego zaproponowała grupa z Yale University



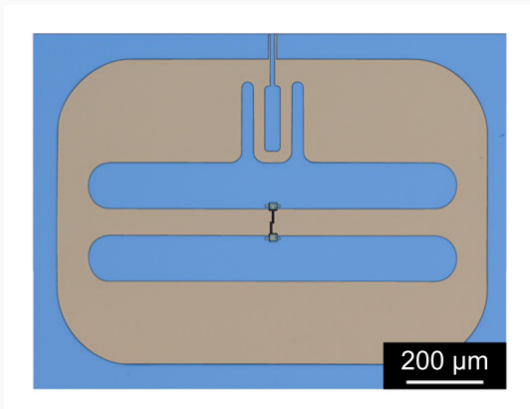
J. Koch et al, Phys. Rev. A 76, 042319 (2007).

⇒ dwa obszary nadprzewodnika w konfiguracji Josephsona

⇒ kontrolę stanów zapewnia indukcyjność (tzw. **transmon**)

TRANSMON: WSPÓŁCZESNE REALIZACJE

Architektura transmonów jest najbardziej obiecującym (pod względem praktycznym) rodzajem qubitów nadprzewodzących

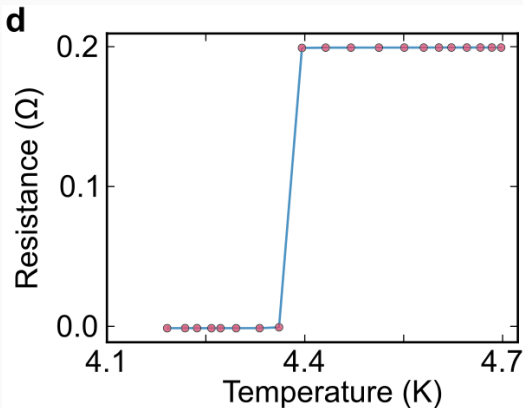


Przykład: transmon z wykorzystaniem tantalu (Princeton University).

A.P.M. Place et al, Nature Comm. 12, 1779 (2021).

TRANSMON: WSPÓŁCZESNE REALIZACJE

Architektura transmonów jest najbardziej obiecującym (pod względem praktycznym) rodzajem qubitów nadprzewodzących

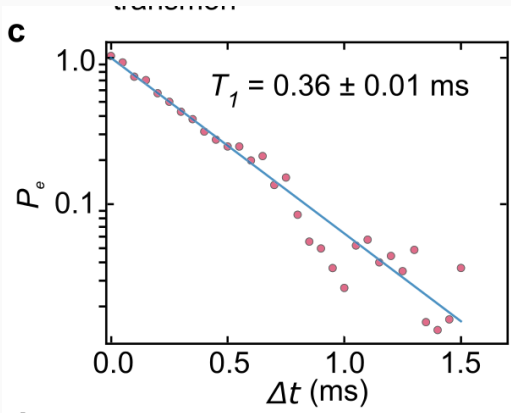


Temperatura krytyczna dla tantalu wynosi $T_c = 4,38$ K.

A.P.M. Place et al, Nature Comm. 12, 1779 (2021).

TRANSMON: WSPÓŁCZESNE REALIZACJE

Architektura transmonów jest najbardziej obiecującym (pod względem praktycznym) rodzajem qubitów nadprzewodzących



Czas relaksacji podłużnej ma rekordowo dużą wartość $T_1 = 0,36$ ms.

A.P.M. Place et al, Nature Comm. 12, 1779 (2021).

Aktualne doniesienia

PROCESOR: WILLOW

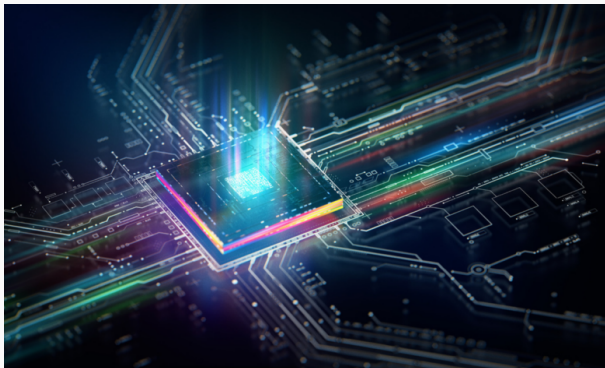
W grudniu 2024 roku firma Google zademonstrowała 105-qubitowy procesor nadprzewodnikowy o nazwie Willow



Zdjęcie układu z procesorem Willow firmy Google.
Google Quantum AI and collaborators, Nature 638, 920 (2024).

PROCESOR: WILLOW

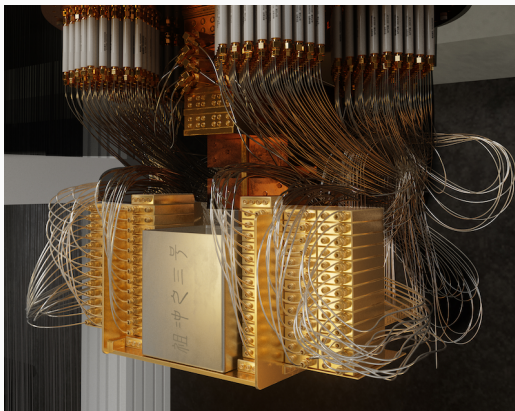
Symulacja rozkładu prawdopodobieństwa uzyskana w ciągu 5 minut przez procesor Willow wymagałaby pracy najszybszego na świecie klasycznego komputera przez 10^{25} lat.



Procesor Willow (105 nadprzewodzących qubitów typu transmonowego).
H. Neven (Google blog, 9 December 2024).

PROCESOR: ZUCHONGZHI 3.0

Procesor 105-qubitowy skonstruowany przez grupę kierowaną przez prof. Jian-Wei Pan (University of Science and Technology, Chiny)

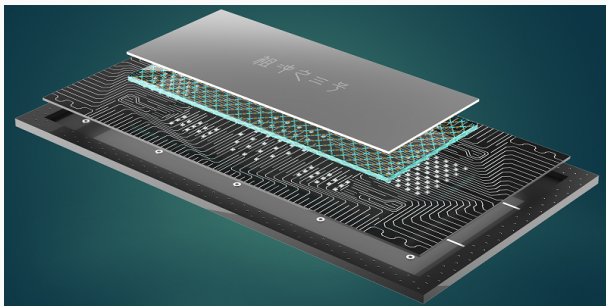


Zdjęcie kriostatu schładzającego procesor Zuchongzhi 3.0.

D. Gao et al, Phys. Rev. Lett. 134, 090601 (2025).

PROCESOR: ZUCHONGZHI 3.0

Symulacja rozkładu prawdopodobieństwa uzyskana w ciągu 100 sekund przez procesor Zuchongzhi 3.0 wymagałaby pracy najszybszego na świecie klasycznego komputera przez conajmniej kilka miliardów lat.

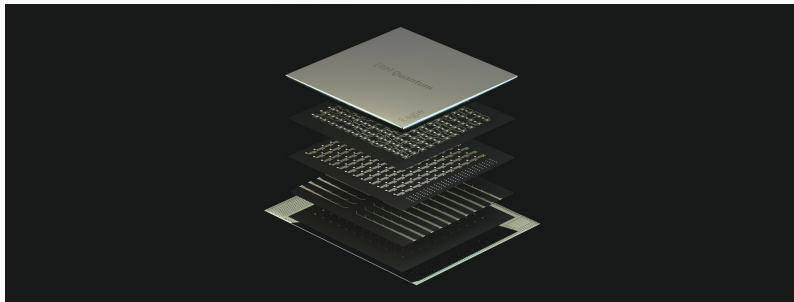


Procesor Zuchongzhi 3.0 (105 qubitów ustawionych po 15 sztuk w 7 rzędach).

D. Gao et al, Phys. Rev. Lett. 134, 090601 (2025).

PROCESOR: EAGLE

W listopadzie 2021 r. firma IBM przekazała informację o skonstruowaniu 127-qubitowego procesora nadprzewodzącego, który nazwano **Eagle**.



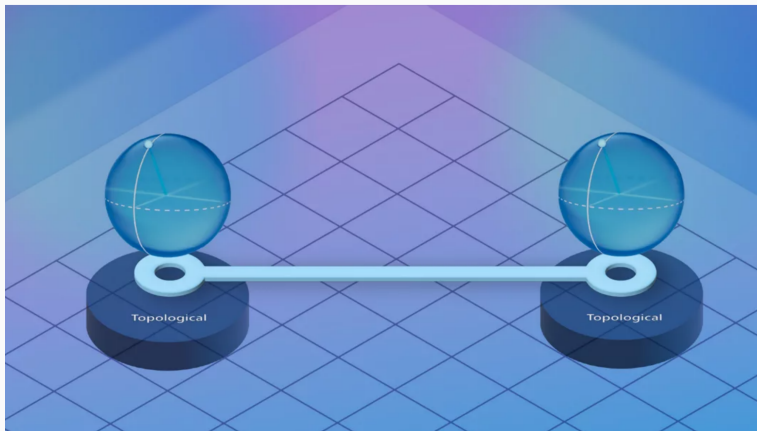
<https://postquantum.com/industry-news/ibm-eagle/>

Topologiczny komputer kwantowy

(zarys pomysłu i perspektywa realizacji)

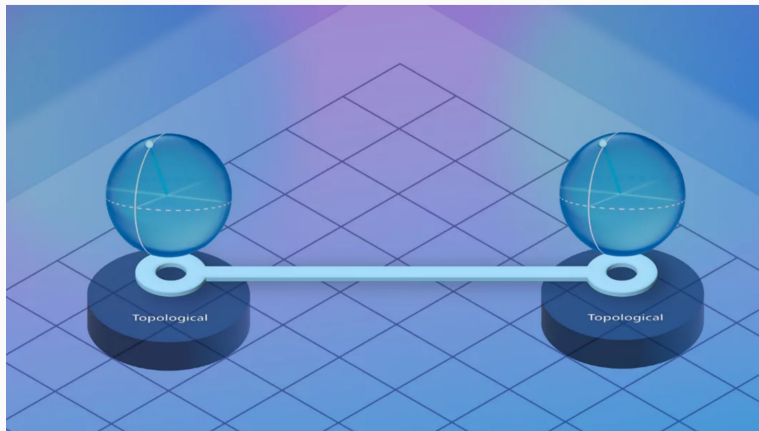
TOPOLOGICZNY QUBIT

Istota topologicznego qubitu nadprzewodzącego opiera się na
⇒ kwazicząstkach Majorany.



TOPOLOGICZNY QUBIT

Istota topologicznego qubitu nadprzewodzącego opiera się na
⇒ kwazicząstkach Majorany.

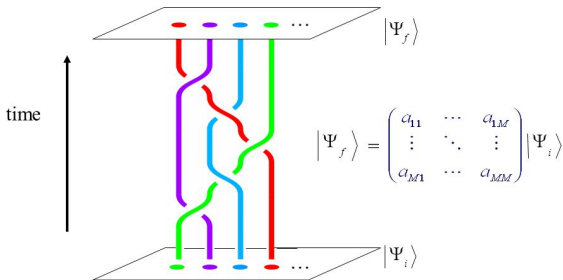


Jedną z bardzo ważnych zalet tego rodzaju qubitów jest:
⇒ **topologiczna protekcja** Majoran na wpływ otoczenia.

KWANTOWE OBLICZENIA

Konstrukcja bramek logicznych dla topologicznych qubitów bazuje na:
⇒ przeplataniu (ang. braiding) kwazicząstek Majorany.

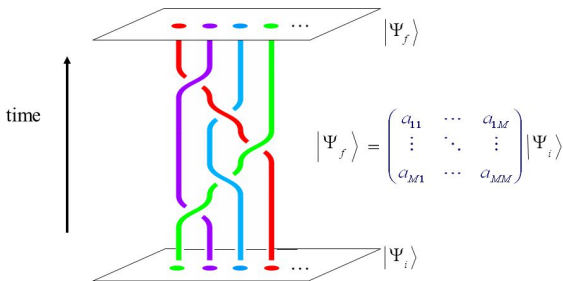
Topological Quantum Computation



KWANTOWE OBLICZENIA

Konstrukcja bramek logicznych dla topologicznych qubitów bazuje na:
⇒ przeplataniu (ang. braiding) kwazicząstek Majorany.

Topological Quantum Computation

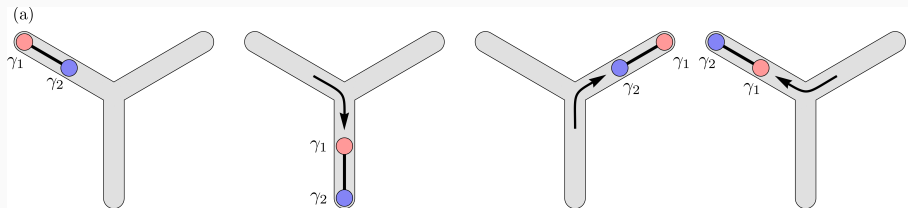


Kwazicząstki Majorany podlegają regułom:

⇒ **nieabelowej statystyki** (kolejność przestawień jest istotna).

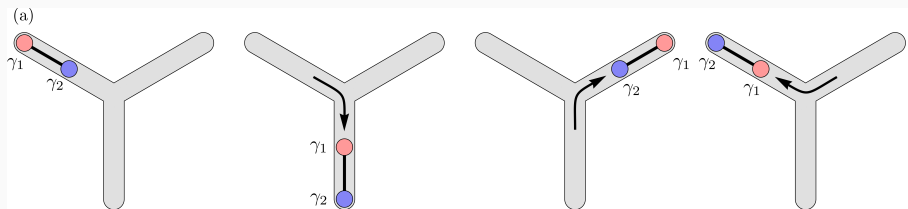
ZAMIANA MIEJSCAMI

**Najprostszy proces zamiany miejscami jednej pary kwazicząstek
Majorany można uzyskać w konfiguracji tróźłącza:**



ZAMIANA MIEJSCAMI

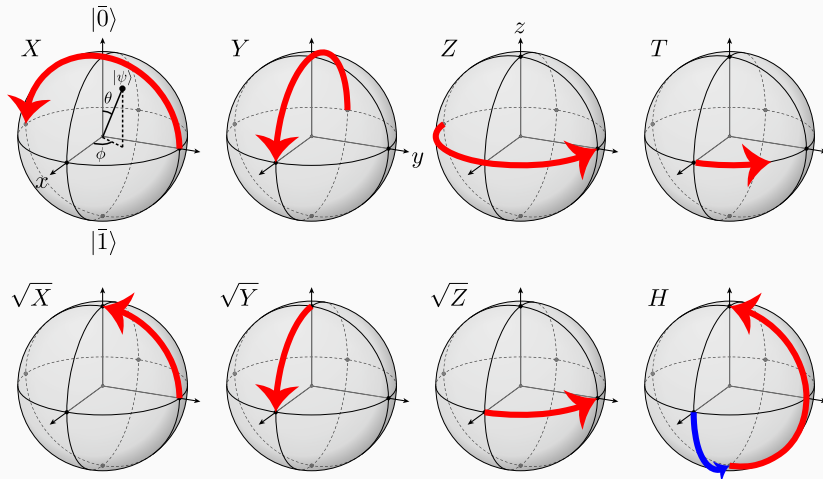
Najprostszy proces zamiany miejscami jednej pary kwazicząstek Majorany można uzyskać w konfiguracji tróźłącza:



Wymianę Majoran $\gamma_1 \leftrightarrow \gamma_2$ można zrealizować poprzez włączanie oraz wyłączanie topologiczności w segmentach tróźłącza.

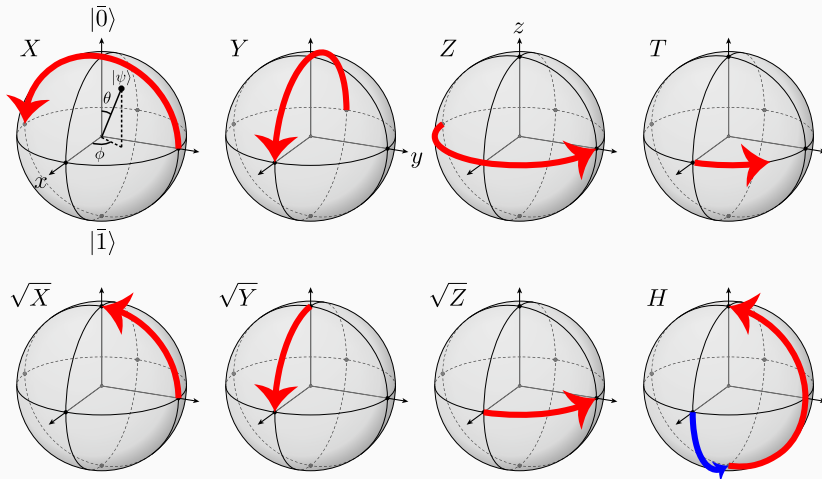
BRAMKI KWANTOWE

Do zrealizowania qubitu wykorzystywanego w bramkach kwantowych:



BRAMKI KWANTOWE

Do zrealizowania qubitu wykorzystywanego w bramkach kwantowych:



⇒ potrzeba (przynajmniej) dwóch par kwazicząstek Majorany.

TOPOLOGICZNY QUBIT

Topologiczny qubit można konstruować z czterech Majoran, na które składają się dwie (nielokalne) cząstki typu fermionowego

TOPOLOGICZNY QUBIT

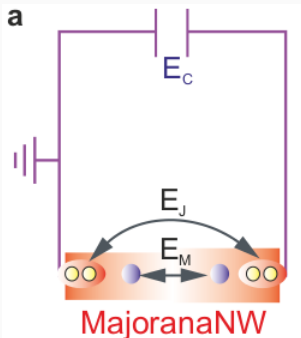
Topologiczny qubit można skonstruować z czterech Majoran, na które składają się dwie (nielokalne) cząstki typu fermionowego

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\gamma}_1 + i\hat{\gamma}_2)$$

$$\hat{f}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\gamma}_3 + i\hat{\gamma}_4)$$

$$\hat{f}_1^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\gamma}_1 - i\hat{\gamma}_2)$$

$$\hat{f}_2^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\gamma}_3 - i\hat{\gamma}_4)$$



TOPOLOGICZNY QUBIT

Liczba tych cząstek fermionowych

$$\hat{n}_1 = \hat{f}_1^\dagger \hat{f}_1 = \frac{1}{1} (1 + i\hat{\gamma}_1\hat{\gamma}_2)$$

$$\hat{n}_2 = \hat{f}_2^\dagger \hat{f}_2 = \frac{1}{1} (1 + i\hat{\gamma}_3\hat{\gamma}_4)$$

określa parzystość układu:

$ 0, 0\rangle$	;	$ 1, 1\rangle$	parzysta liczba fermionów
$ 1, 0\rangle$	;	$ 0, 1\rangle$	nieparzysta liczba fermionów

TOPOLOGICZNY QUBIT

Liczba tych cząstek fermionowych

$$\hat{n}_1 = \hat{f}_1^\dagger \hat{f}_1 = \frac{1}{1} (1 + i\hat{\gamma}_1 \hat{\gamma}_2)$$

$$\hat{n}_2 = \hat{f}_2^\dagger \hat{f}_2 = \frac{1}{1} (1 + i\hat{\gamma}_3 \hat{\gamma}_4)$$

określa parzystość układu:

$|0, 0\rangle$; $|1, 1\rangle$ parzysta liczba fermionów

$|1, 0\rangle$; $|0, 1\rangle$ nieparzysta liczba fermionów

W obrębie tej samej parzystości układ fizyczny ma zapewnioną
ochronę topologiczną, tzn. ma odporność na dekoherencję itp.

TOPOLOGICZNY QUBIT: PRZYKŁAD

Możliwym wariantem wyboru qubitu jest:

$$|0\rangle \equiv |0, 0\rangle$$

$$|1\rangle \equiv |1, 1\rangle$$

TOPOLOGICZNY QUBIT: PRZYKŁAD

Możliwym wariantem wyboru qubitu jest:

$$|0\rangle \equiv |0, 0\rangle$$

$$|1\rangle \equiv |1, 1\rangle$$

Operacje kwantowe prowadzą do finalnego stanu:

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2) |0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2) |1, 1\rangle$$

TOPOLOGICZNY QUBIT: PRZYKŁAD

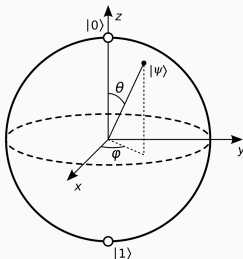
Możliwym wariantem wyboru qubitów jest:

$$|0\rangle \equiv |0, 0\rangle$$

$$|1\rangle \equiv |1, 1\rangle$$

Operacje kwantowe prowadzą do finalnego stanu:

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2) |0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2) |1, 1\rangle$$



gdzie θ jest kątem biegunowym, zaś ϕ kątem azymutalnym.

TOPOLOGICZNY KOMPUTER: KONCEPCJA

⇒ Kwantowy komputer: obwód złożony z bramek kwantowych

TOPOLOGICZNY KOMPUTER: KONCEPCJA

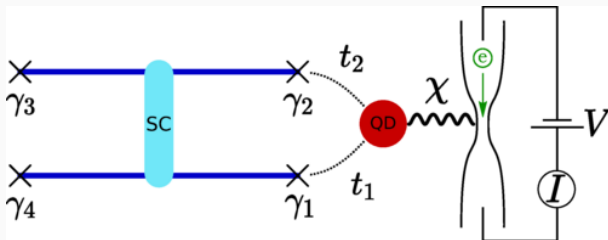
- ⇒ Kwantowy komputer: obwód złożony z bramek kwantowych
- ⇒ Procedura działania: ewolucja układu od stanu początkowego, przez zestaw bramek, do stanu końcowego

TOPOLOGICZNY KOMPUTER: KONCEPCJA

- ⇒ Kwantowy komputer: obwód złożony z bramek kwantowych
- ⇒ Procedura działania: ewolucja układu od stanu początkowego, przez zestaw bramek, do stanu końcowego
- ⇒ Odczyt wyników: pomiar parzystości poprzez fuzję Majoran

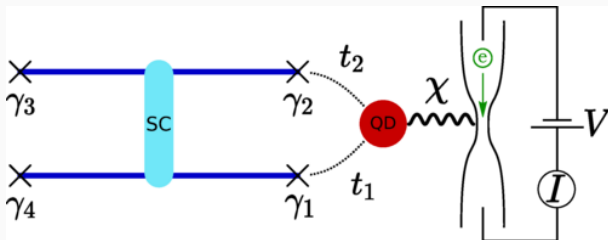
TOPOLOGICZNY KOMPUTER: KONCEPCJA

- ⇒ Kwantowy komputer: **obwód złożony z bramek kwantowych**
- ⇒ Procedura działania: **ewolucja układu od stanu początkowego, przez zestaw bramek, do stanu końcowego**
- ⇒ Odczyt wyników: **pomiar parzystości poprzez fuzję Majoran**



TOPOLOGICZNY KOMPUTER: KONCEPCJA

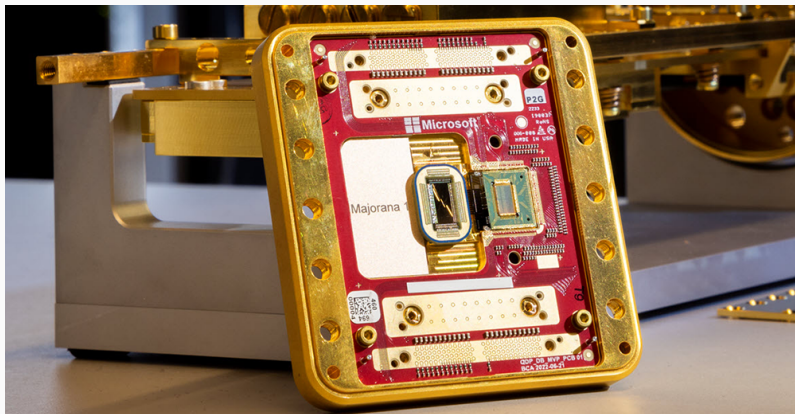
- ⇒ Kwantowy komputer: **obwód złożony z bramek kwantowych**
- ⇒ Procedura działania: **ewolucja układu od stanu początkowego, przez zestaw bramek, do stanu końcowego**
- ⇒ Odczyt wyników: **pomiar parzystości poprzez fuzję Majoran**



- ⇒ Detekcja: **pomiar ładunku na dołączonej kropce kwantowej.**

AKTUALNOŚCI

W lutym 2025 r. firma Microsoft przekazała informację o skonstruowaniu pierwszego procesora na bazie topologicznego nadprzewodnika.



<https://www.youtube.com/shorts/jPrI2wO1GfM>