

# intoDIGITAL #1

## Komputery i obliczenia kwantowe dla biznesu

dr Sebastian Zajac

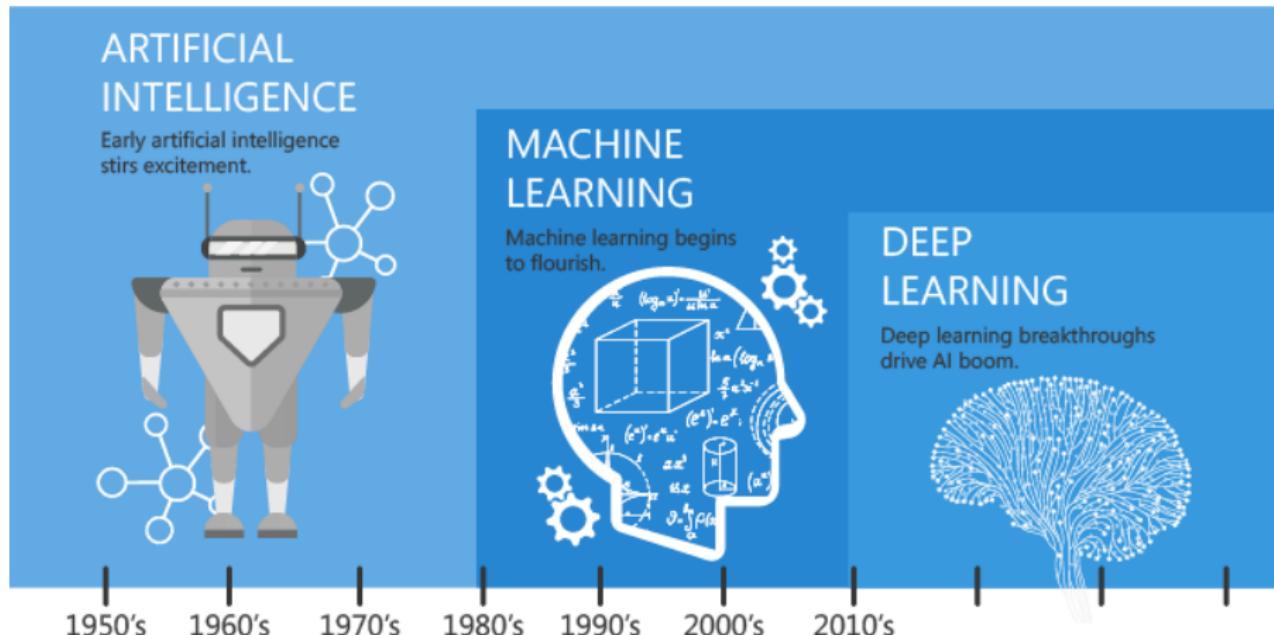
Zakład Wspomagania i Analizy Decyzji SGH

22.11.2022

Seminarium będzie nagrywane. Nagranie może zostać upubliczzone.

# Technologia XXI wieku...

## Sztuczna inteligencja



# Sztuczna inteligencja

Historia AI sięga 1950 roku (A. Turing).

Rozwój technologii związanych z danymi ustrukturyzowanymi i nieustrukturyzowanymi realizowany np. w:

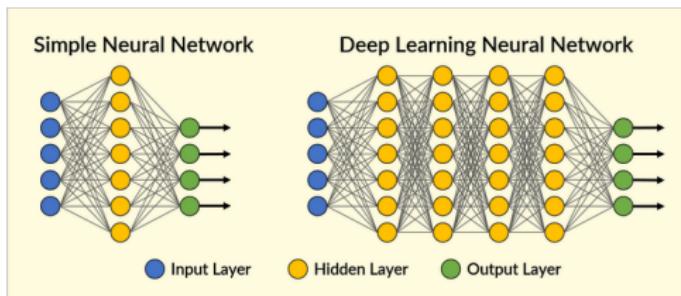
- rozpoznawanie i tworzenie „mowy”
- „rozumienie” obrazów i filmów
- rozgrywanie gier
- rekomendacje
- systemy diagnostyczne
- planowanie
- podejmowanie decyzji
- boty, agenci ...

Zadania te realizowane są w oparciu o ML i DL.

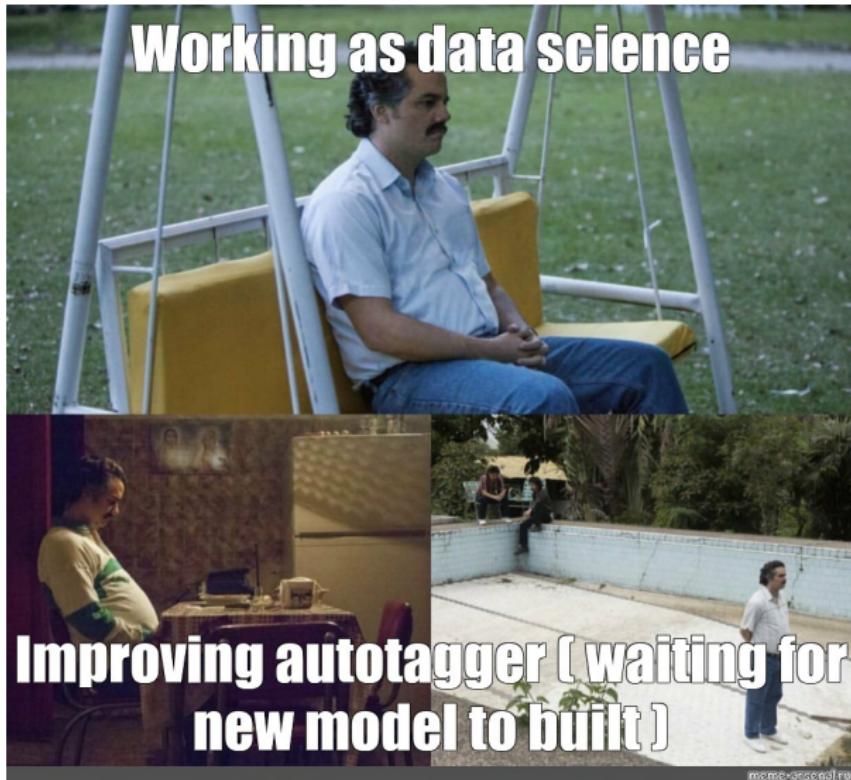
# Dlaczego AI ?

## Dane

- Eksponencjalny wzrost ilości (treningowych) danych dostępnych w social mediach, internecie, aplikacjach mobilnych, IoT.
- Wzrost możliwości i spadek ceny (kosztów) jakości sprzętu komputerowego - co-procesory GPU, TPU, ...
- Oprogramowanie Open Source



To be or not to be?



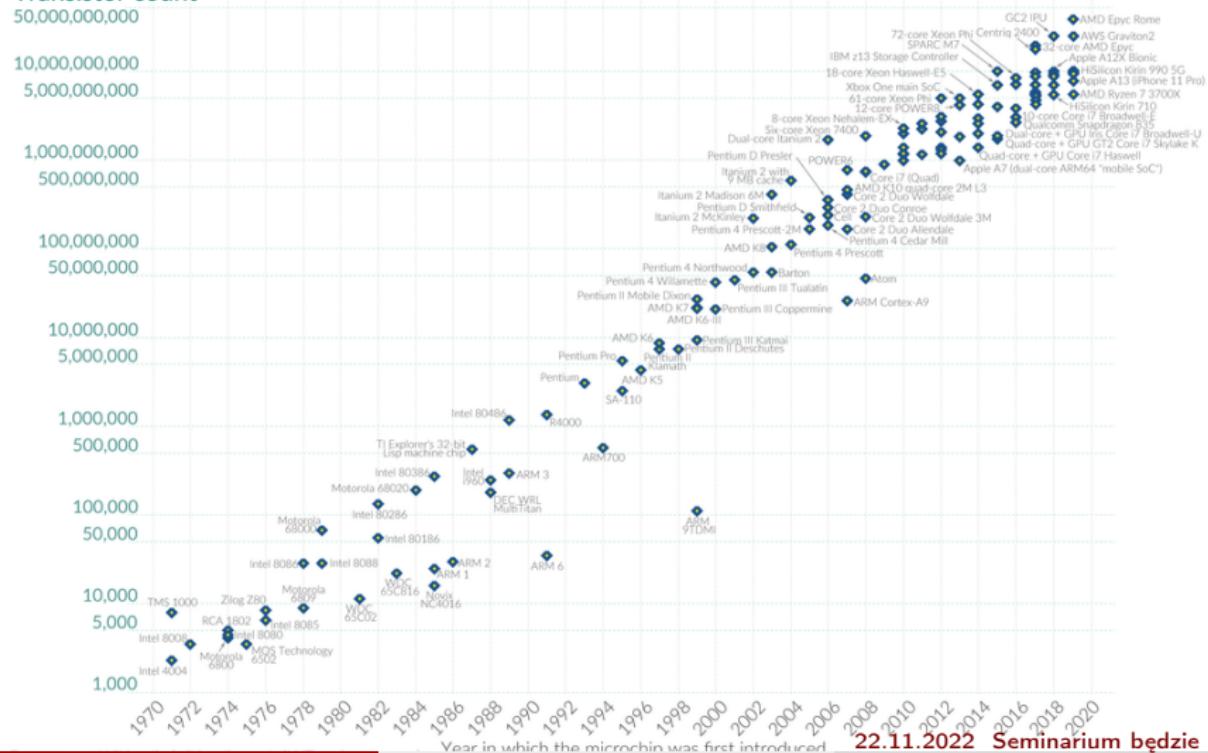
# Klasyczne komputery

## Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Our World  
in Data

### Transistor count



# Klasyczne komputery

## Moore's law

An observation that the number of transistors on microchip roughly doubles every two years, whereas its cost is halved over that same timeframe.

*The growth of microprocessors is exponential*

Zwiększenie szybkości działania oraz pojemności klasycznych komputerów co dwa lata zmniejszając przy tym koszty.

## Fizyczne (klasyczne) ograniczenia

- Rozmiary tranzystora > rozmiary atomów lata 90 500nm obecnie 14nm i 7nm
- Prędkość światła  $\sim$  max. prędkość przesyłu informacji.
- wysoki koszt wytwarzania (kierunek układów wieloprocesorowych)
- wysoki pobór prądu, ciepło

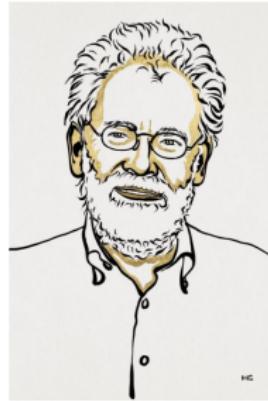
## The Nobel Prize in Physics 2022



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
Alain Aspect



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
John F. Clauser



III. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach  
Anton Zeilinger

for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

# Historia

- 1936 Alan Turing "On Computable Numbers" (Hilbert Problems) - universal computing machine
- 1976 Roman S. Ingarden "Quantum Information Theory"
- 1980 Paul Benioff - teoretyczna możliwość komputerów kwantowych "Computer as a Physical System..."
- 1981 Richard Feynman - Klasyczne komputery nie podołają z symulowaniem procesów kwantowych. "Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy."
- 1985 David Deutsch pierwszy opis kwantowej maszyny Turinga. Algorytm do uruchomienia na komputerze kwantowym. Bramki kwantowe.
- 1994 Peter Shor - Algorytm faktoryzacji liczb w czasie wielomianowym.
- 1996 Lov Grover - Algorytm Grover'a "A fast quantum mechanical algorithm for database search"

# Historia

- 2000 pierwszy 5-kubiotowy kwantowy komputer (oparty na nuklearnym rezonansie magnetycznym).
- 2001 demonstracja algorytmu Shora
- 2007 implementacja algorytmu Deutschas'a
- 2011 D-Wave pierwsza sprzedaż komercyjnego komputera kwantowego
- 2013 pierwszy komputer kwantowy w Google
- 2017 IBM - klasyczne superkomputery nie mogą symulować więcej niż 56 kubitów - quantum supremacy
- 23 października 2019 Google ogłasza uzyskanie QS na 53 kubitach - superkomputer powinien działać i liczyć 10000 lat.
- IBM zmienia algorytm próbkowania uzyskując lepszy wynik na superkomputerze niż Google.
- 2020 University of Science and Technology of China (Jian-Wei Pan) 76 fotonowych kubitów na komputerze Jiuzhang - 20 sekund samplingu = 600 milionów lat obliczeń na super komputerze.
- 2021 USTC ... 2022 Xanadu ...

# Obliczenia Kwantowe

Obliczenia kwantowe (Quantum Computing) to nowy paradymat wykorzystujący własności mechaniki kwantowej (superpozycja, splątanie, interferencja) do wykonywania obliczeń

## Modele obliczeń kwantowych

- Quantum Circuits - bramkowy model obliczeń kwantowych
- adiabatyczne obliczenia kwantowe,
- topologiczne komputery kwantowe

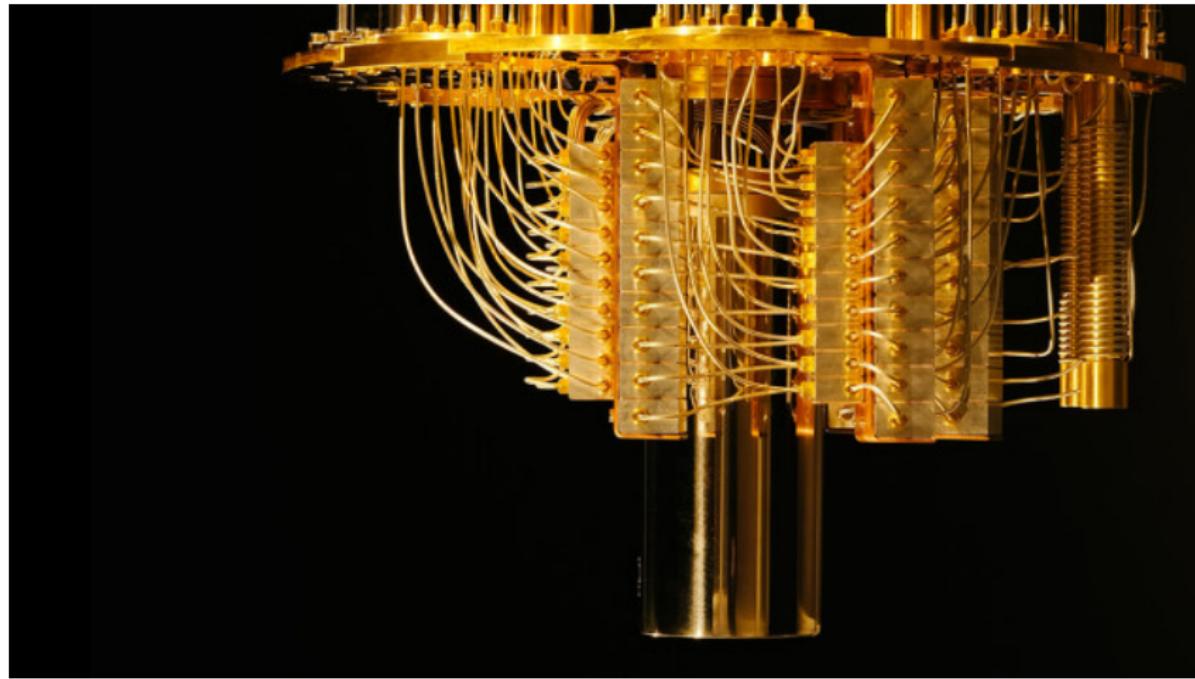
## jeszcze jedna zasada fizyki kwantowej

Dekoherencja - oddziaływanie „niszczące” stan kwantowy - Obliczenia Kwantowe potrzebują tzw. korekcji błędów. ERA Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)

## Jak wyobrażam sobie komputer kwantowy?

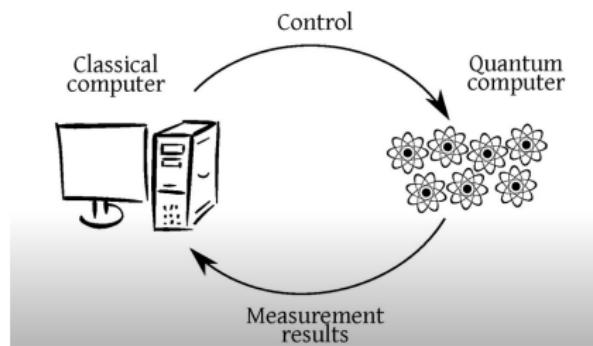
Lista dostępnych procesorów kwantowych:

[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_quantum\\_processors](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quantum_processors)

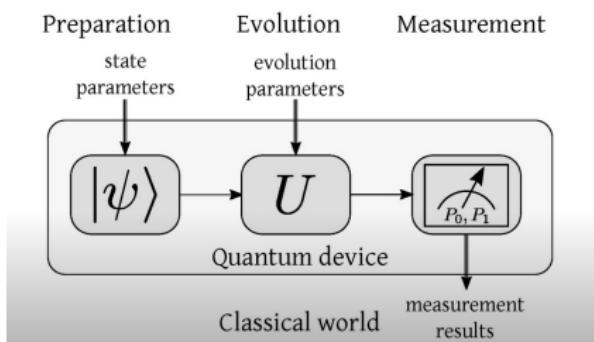


# Proces obliczeń kwantowych

Quantum computation control loop



Computation as experiment



# Kwantowe Bity

**CLASSICAL COMPUTERS**



1 STATE AT A TIME

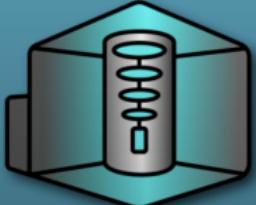
BITS



BITS ARE INDEPENDENT OF EACH OTHER

**CLASSICAL VS. QUANTUM**

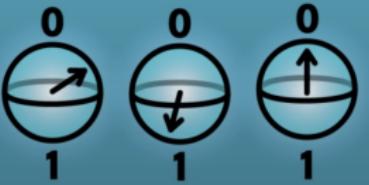
**QUANTUM COMPUTERS**



SUPERPOSITION  
ENTANGLEMENT  
INTERFERENCE

MANY STATES AT A TIME

QUBITS



QUBITS ARE IN A COMBINED STATE TOGETHER

# Kubity dla fizyka

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$$



Quantum superposition

It's a well known fact that you must spin a USB **three times** before it will fit. From this, we can gather that a USB has three states:

**Up position**



**Down position**



**Superposition**



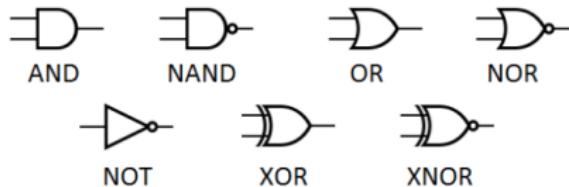
Until the USB is observed it will stay in the superposition. Therefore it will not fit until observed - except for in cases of USB tunnelling.

**intel**  
Software

t.że:  $|a|^2 + |b|^2 = 1$

# Bramki kwantowe

Klasyczne bramki kwantowe działają na bitach i są najczęściej nieodwracalne. Klasyczne bramki używane najczęściej:



Kwantowe bramki (realizują operatory liniowe), są w pełni odwracalne.

$$U = e^{-iHt}$$

takie, że:  $UU^\dagger = U^\dagger U = I$ . Wiele bramek kwantowych nie ma odpowiedników klasycznych: np. Bramka Hadamarda, Bramka CNOT.

# Splątanie kwantowe

Splątanie kwantowe to własność złożonych układów kwantowych.

Klasycznie operujemy na bitach połączonych w bajty.

Kubity możemy łączyć w tzw. rejesty kwantowe. Jeden kubit może istnieć w superpozycji 2 stanów. N kubitów to superpozycja  $2^n$  stanów.

$$|\psi\rangle = \alpha_0 |0\rangle + \alpha_1 |1\rangle = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \quad \text{and} \quad |\phi\rangle = \beta_0 |0\rangle + \beta_1 |1\rangle = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix}$$

$$|\psi\rangle \otimes |\phi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0\beta_0 \\ \alpha_0\beta_1 \\ \alpha_1\beta_0 \\ \alpha_1\beta_1 \end{bmatrix} = \alpha_0\beta_0|0\rangle \otimes |0\rangle + \alpha_0\beta_1|0\rangle \otimes |1\rangle + \alpha_1\beta_0|1\rangle \otimes |0\rangle + \alpha_1\beta_1|1\rangle \otimes |1\rangle$$

Przykład 3 kubity:

$$|\psi_0\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle \otimes |0\rangle \equiv |000\rangle$$

$$|\psi_1\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle \otimes |1\rangle \equiv |001\rangle$$

⋮

$$|\psi_7\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle \otimes |1\rangle \equiv |111\rangle$$

## Stan splątany

dwa kubity - iloczyn tensorowy

Weźmy dwa kubity i zapiszmy je jako iloczyn tensorowy:

$$|\psi_1\rangle = \gamma_0|00\rangle + \gamma_1|01\rangle + \gamma_2|10\rangle + \gamma_3|11\rangle$$

Dokonujemy pomiaru jednego kubitu.

## Splątane dwa kubity

Istnieją jednak stany dwóch kubitów, których nie da się przedstawić jako iloczyn tensorowy ich składników - tzw. Stany Bella:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle$$

pomiar pierwszego kubitu definiuje stan drugiego kubitu.

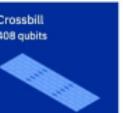
## Dlaczego to ważne

Splątanie jest kluczowym czynnikiem przyśpieszenia w działaniu i możliwości obliczeniowej dla komputerów kwantowych. Wystarczy  $n$  kubitów (fizycznych) aby generować obliczenia na przestrzeni  $2^n$ . W przypadku klasycznych komputerów podwojenie mocy oznacza podwojenie liczby bitów, dla komputera kwantowego wystarczy dodać jeden kubit.

# Development Roadmap

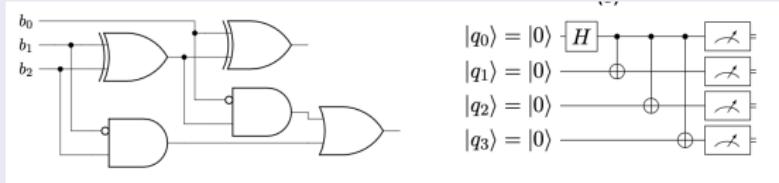
Executed by IBM  
On target

IBM Quantum

2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026+	
Run quantum circuits on the IBM cloud	Demonstrate and prototype quantum algorithms and applications	Run quantum programs 100x faster with Qiskit Runtime	Bring dynamic circuits to Qiskit Runtime to unlock more computations	Enhancing applications with elastic computing and parallelization of Qiskit Runtime	Improve accuracy of Qiskit Runtime with scalable error mitigation	Scale quantum applications with circuit knitting toolbox controlling Qiskit Runtime	Increase accuracy and speed of quantum workflows with integration of error correction into Qiskit Runtime	
Model Developers				Prototype quantum software applications	Quantum software applications			
Algorithm Developers		Quantum algorithm and application modules		Quantum Serverless	Machine learning   Natural science   Optimization			
Kernel Developers	Circuits	Qiskit Runtime	Dynamic circuits	Threaded primitives	Error suppression and mitigation	Intelligent orchestration	Circuit Knitting Toolbox	
System Modularity	Falcon 27 qubits 	Hummingbird 65 qubits 	Eagle 127 qubits 	Osprey 433 qubits 	Condor 1,121 qubits 	Flamingo 1,386+ qubits 	Kookaburra 4,158+ qubits 	Scaling to 10K-100K qubits with classical and quantum communication
			Heron 133 qubits x p 	Crossbill 408 qubits 				

# Modele obliczeń kwantowych

## Model bramek kwantowych na kubitach



## Adiabatyczne kwantowe obliczenia

Wykorzystanie twierdzenia adiabatycznego - minimalizacja energii (Hamiltonian). QUBO (Quadratic unconstrained binary optimization) jako analog modelu Isinga. W sieciach neuronowych teoria sieci Hopfielda. Pozwala realizować kombinatoryczne problemy optymalizacyjne (NP-trudne) "kwadratowo szybciej niż klasyczne rozwiązania" - Logistyka i finanse (optymalizacja portfolio).

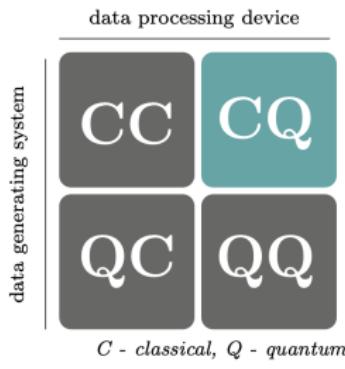
# Modele obliczeń kwantowych

## topologiczne obliczenia kwantowe

Faza teoretyczna. Oparta o 2-dim kwazicząstki - Anyony i ich własności w 3dim przestrzeni.

## Variational Quantum Algorithms

VQA oraz QAOA (quantum approximate optimization algorithms) jako metody hybrydowe. Łączą obliczenia klasyczne i kwantowe przez twz. pętlę zwrotną.



Czas obliczeń klasycznych komputerów - koszty prądu, chłodzenia obliczenia problemów optymalizacyjnych ...

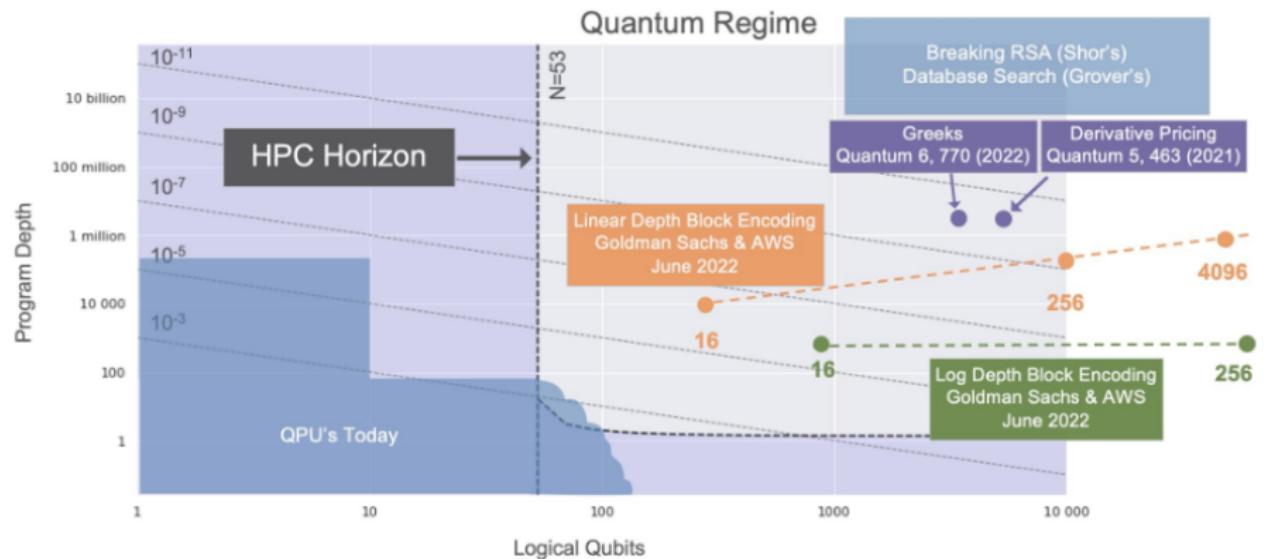
## Problemy optymalizacyjne

- Optymalizacja portfolio
- Selekcja zmiennych w modelach scoringowych
- Alokacja kapitału
- Credit Scoring
- detekcja fraudów
- ...

## ML

- Rozwiązywanie układów równań liniowych - HHL algorytm
- QSVM, QPCA, Kwantowe sieci neuronowe

# Gdzie jesteśmy



# Gdzie zacząć?

## Obliczenia kwantowe

- **IBM Quantum Lab** środowisko Qiskit (Jupyterlab), dokumentacja Qiskit <https://qiskit.org/learn/>,
- **D-Wave** <https://www.dwavesys.com/build/getting-started/>
- **Xanadu** (Canada) - qubity oparte o fotony
- **AWS Braket**

## Programming:

- Python: Qiskit, PennyLane, TensorFlow Quantum, Cirq
- Julia: Braket.jl <https://forem.julialang.org/kshyatt/introducing-braketjl-10f2>

## QPoland, Warsaw Quantum Computing Group

(<https://www.youtube.com/@quantumaifoundation>),

Grover's Algo (<https://www.youtube.com/watch?v=KeJqcnpPluc>),

QUBO example (<https://www.youtube.com/watch?v=YJhv4bhNf6M>)

# Summary

Dziękuję za uwagę!  
sebastian.zajac@sgh.waw.pl