ELKH
Eötvös Loránd
Research Network

Kvantum erőforrások áttekintése

Farkas Zoltán, ELKH SZTAKI LPDS

zfarkas@sztaki.hu

www.elkh.org

Kivonat

- Kvantuminformatika alapköve: pár szóban a qubit-ekről
- Főbb kvantum számítási modellek áttekintése:
  - Annealing
  - Kvantumáramkörök
- Erőforrások bemutatása
  - Implementációs részletek
  - Hozzáférési lehetőségek
  - Fejlesztőeszközök
- Kvantum számítási modellek kiaknázását segítő fejlesztőeszközök, kiegészítő könyvtárak:
  - Gépi tanulás
  - Optimalizációs problémák
- Összefoglalás

Qubit-ek

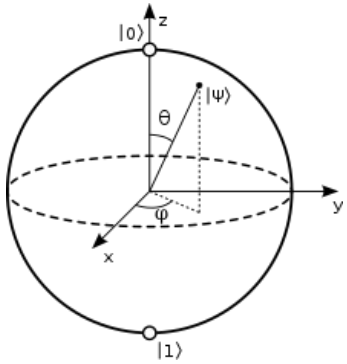
- Klasszikus bit: 0 és 1 értékek
- Kvantumbit (qubit):
  - Kvantum információ alapegysége
  - Két állapotú kvantummechanikai rendszer
- Példák:
  - Elektron spinje (up, down)
  - Foton polarizációja (vízszintes, függőleges)
- Lehetséges állapotok:
  - Nem kizárólag a két alapállapot (0, 1)
  - Hanem ezek szuperpozíciója is
- Alapállapotok: |0> és |1> (Dirac jelölés)

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Qubit-ek

- Szuperpozíció: nem |0> és nem |1> állapot, de ezek lineáris kombinációjaként leírható:
  - $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
  - α és β: komplex számok, valószínűségi amplitúdók
  - $|\alpha|^2+|\beta|^2=1$
- Bloch gömb reprezentáció
  - Klasszikus bit csak a gömb “északi” és “déli” pólusán szerepelhet
  - Qubit állapota a gömb felületének bármely pontját elfoglalhatja
  - α és β leírható az ábrán látható Θ és φ szögekkel is
- Mérés:
  - qubit-nek definit 0 vagy 1 értéke lehet méréskor
  - 0 érték valószínűsége: $|\alpha|^2$
  - 1 érték valószínűsége: $|\beta|^2$



$$\alpha = \cos\frac{\theta}{2},$$
$$\beta = e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2},$$

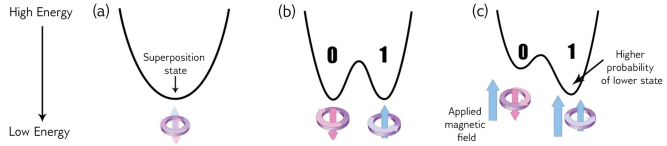
Képek forrása: https://en.wikipedia.org/wiki/Qubit

Kvantum számítási modellek

- Alapvetően két fő csapásirány:
  - Annealing modell
  - Kvantumáramkörök
- Annealing modell:
  - Egy optimalizációs folyamat
  - Adott célfüggvény globális, esetleg lokális minimum értékének meghatározása
- Kvantumáramkörök:
  - Jobban hasonlít a klasszikus számítási modellekhez
  - Qubit-eken operáló kapukat alkalmaz
  - Csavar:
    - Nem csak 0 és 1 értékeket vehetnek fel az egyes qubit-ek, ezek szuperpozíciója is előfordulhat
    - Állapot meghatározásakor (mérés) adott valószínűséggel tudunk mérni
- Közös pont: mindegyik modell qubit-eken operál

Annealing modell

- A kvantum annealing
  - egy optimalizációs folyamat,
  - adott célfüggvény globális, esetleg lokális minimum értékének meghatározásához,
  - főként diszkrét értékeken,
  - kvantumfluktuáció segítségével.

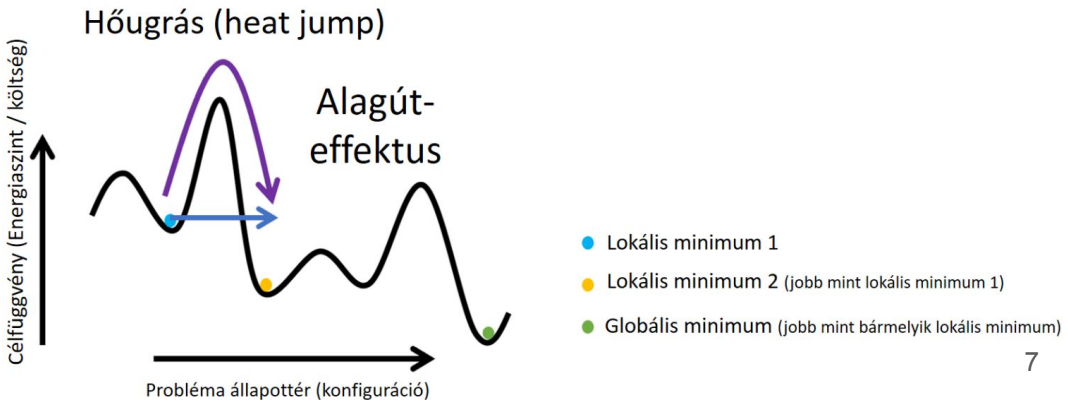


- Főként optimalizációs problémák megoldására használható, de egyéb alkalmazási terület is lehetséges
- Folyamata:
  - Minden lehetséges állapot szuperpozíciójából indítjuk a rendszert, a lehetséges állapotokhoz azonos súlyokat rendelve
  - Ezt követően a rendszer állapota a kvantummechanika evolúciója szerint változik
  - Ezalatt az állapotok amplitúdója folyamatosan változik
  - Alagúteffektus kihasználása

Kép forrása: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_qs_2.html

Annealing modell

- Szimulált annealing:
  - Klasszikus számítástechnikában használatos módszer
  - Egy lokális minimumról, hogy eldöntsük, van-e annál alacsonyabb szint, el kell indulnunk valamilyen irányba felderíteni az állapotteret
  - Ez költséges
- Kvantum annealing:
  - A szimulált annealing-nél hatékonyabb
  - Az alagút-effektust kihasználva



Kvantumáramkörök

- Klasszikus számítási modellhez hasonló
- Alapvető építőelemek:
  - Qubit-ek
  - Kapuk
  - Mérések
- Valamilyen állapotból indítjuk a rendszert
- Feldolgozás balról jobbra
- Több végrehajtás történik (*shot*-ok)
- A mért eredményekből vonjuk le a következtetéseket

Kvantumáramkörök - Kapuk

- Mátrixokkal leírhatóak, a művelet elvégzése a mátrix és a qubit(ek) oszlopvektorának szorzata
- Például forgatás X tengely körül 180 fokkal (Pauli X):

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

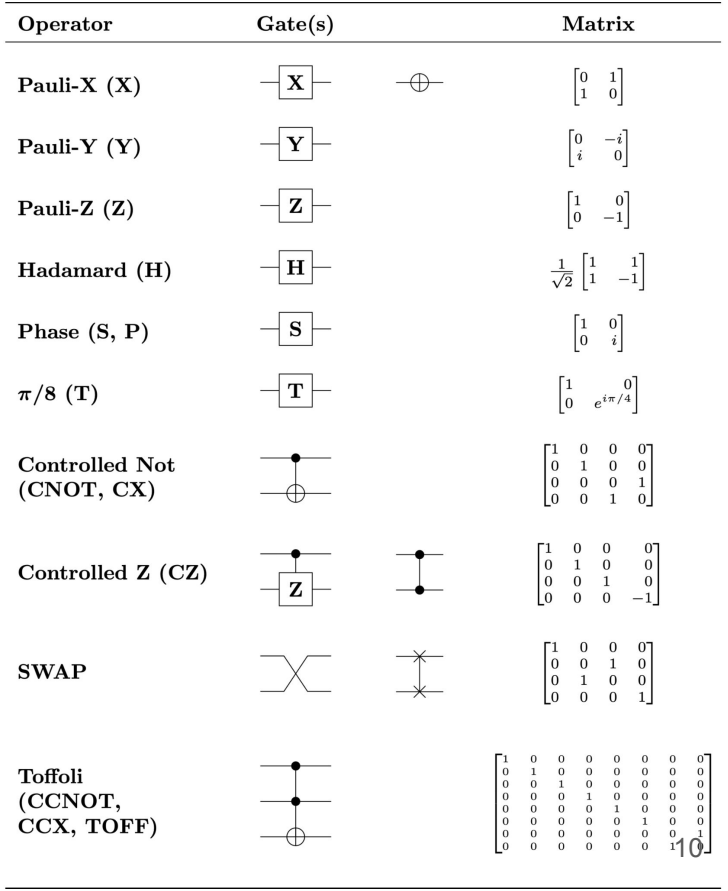
- Végezzük el a műveletet az |0> qubit állapoton:

$$X|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$

- A fenti művelet megfelel a NOT kapunak, mert:
  - X|1> = |0>

Kvantumáramkörök - Kapuk

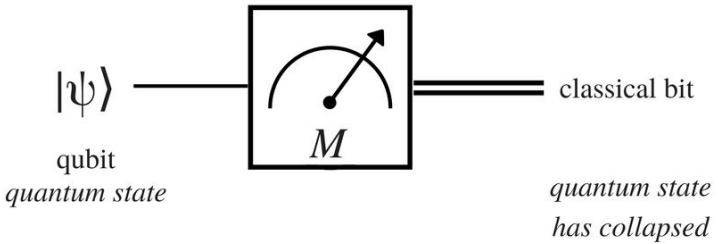
- Unáris: egyetlen qubit-en elvégzett művelet
  - Identity: állapotot változatlanul hagyja
  - PauliX (vagy NOT): X tengely körüli forgatás 180 fokkal
    - NOT, mert a |0> állapotból |1> állapotra fordít, és viszont
  - PauliY, PauliZ: Y, illetve Z tengely körüli forgatás 180 fokkal
  - Hadamard: egyenlő szuperpozíció állapotába kerül a qubit
- Bináris: két qubit-en elvégzett művelet
  - SWAP: a két qubit felcserélése
  - CNOT:
    - vezérelt NOT
    - első (control) qubit 0 → második (target) qubit IDENTITY
    - első (control) qubit 1 → második (target) qubit NOT
    - |00> → |00>
    - |01> → |01>
    - |10> → |11>
    - |11> → |10>
- Több paraméterű (pl. CCNOT)
- Léteznek paraméterezhető kapuk, pl.:
  - Rx(φ): X tengely körüli, φ fokos forgatás



Kép forrása: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_logic_gate

Kvantumáramkörök - Mérések

- A kvantum áramkör qubit-jeinek állapotát néha megvizsgálnánk
- Erre szolgálnak a mérés kapuk
- Ezek a qubit állapotát egy klasszikus bit értékeként adják vissza
- A kvantumgépek felépítéséből adódóan ez nem-determinisztikus lehet
- Pl. egyenlő szuperpozícióban levő qubit esetén 50% eséllyel mérünk 0, és szintén 50% eséllyel mérünk 1 értéket
- A mérés kapuk eredménye klasszikus bitekben realizálódik
- A mérés után a qubit állapota összeomlik



Kép forrása: https://towardsdatascience.com/understanding-basics-of-measurements-in-quantum-computation-4c885879eba0

Erőforrások

- Több szempont szerint lehet osztályozni
- Hozzáférési módok:
  - Közvetlen (vagy saját felhő szolgáltatás)
  - Publikus felhő alapú (kb. *proxy*)
- Az erőforrás által támogatott modell:
  - Annealing (=D-Wave)
  - Kvantumáramkör (=nagyjából minden más)
- Hardware implementáció:
  - Szupravezető qubit
  - Ioncsapdás
  - Fotonok
  - …
- Szimulátor eszköz is elérhető

Kvantum hardware implementációk - Annealing

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

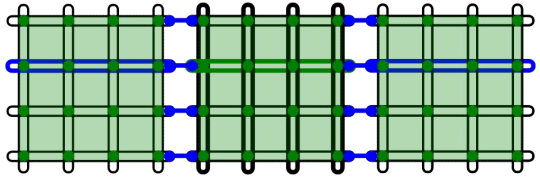
- Jelenleg a D-Wave kínálatában érhetők el annealing modellt követő QPU-k:

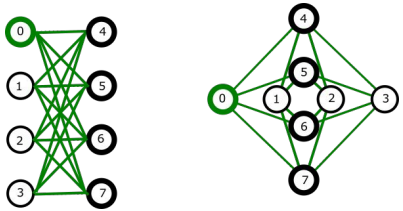
	2000Q	Advantage	Advantage *performance update*
Performance			
Better Solutions (Satisfiability problems)	--	3x more often than 2000Q	23x more often than 2000Q
Time-To-Solution (3D lattice problems)	--	10x faster than 2000Q	2x faster than Advantage
Annealing Quantum Processor Design			
Qubits	2000+	5000+	5000+
Couplers	6000+	35000+	35000+
Couplers Per Qubit	6	15	15
Topology			
Graph	Chimera	Pegasus	Pegasus
Graph Size	C16	P16	P16
Connectivity	Degree 6	Degree 15	Degree 15
Lattice	8x8x8	15x15x12	15x15x12
Chain Length (for problem size n=64)	17	7	6

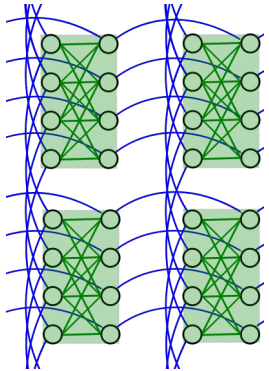
Kép forrása: https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/

Kvantum hardware implementációk - Annealing

- Elérhető processzor topológiák: Chimera, Pegasus
- Chimera:
  - D-Wave 2000Q rendszerek QPU-ja
  - Qubit-ek vertikális és horizontális elrendezésben
  - 4*4-es egységcellákba igazítva
  - Belső csatlakozók:
    - Egy cellán belül egymásra ortogonális qubit-eket kötnek össze
    - Az egységcella belső csatlakozásai gráfként is reprezentálhatók
  - Külső csatlakozók:
    - Cellák között, ugyanabban a sorban vagy oszlopban található qubit-eket kötnek össze
  - Egységcellák belső és külső összekötése gráfként reprezentálható



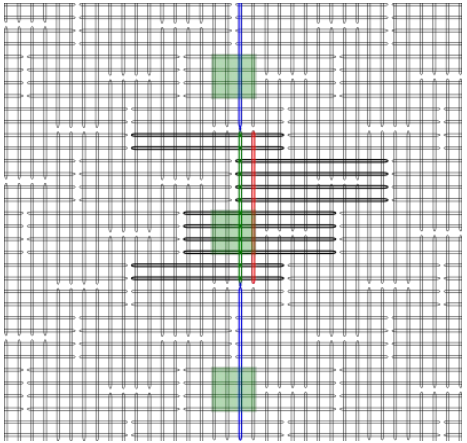


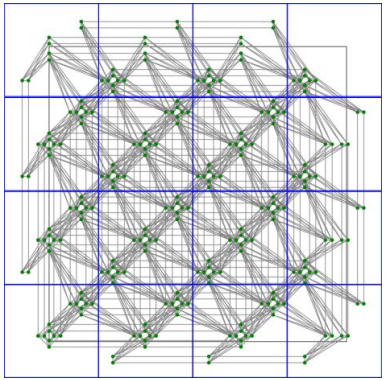


Képek forrása: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_qs_4.html

Kvantum hardware implementációk - Annealing

- Pegasus:
  - D-Wave Advantage rendszerek QPU-ja
  - Chimera topológiához hasonló, de eltolást alkalmazva
  - Belső, külső és páratlan csatlakozók
  - Belső csatlakozók:
    - Ortogonális qubit-eket kötnek össze
    - Minden qubit 12 másik qubit-hez kapcsolódik ezen a módon
  - Külső csatlakozók:
    - Függőleges qubit-eket szomszédos függőleges qubit-ekez kapcsolnak (hasonlóan a vízszinteseket)
  - Páratlan csatlakozók:
    - Hasonlóan rendezett qubit párokat kötnek össze

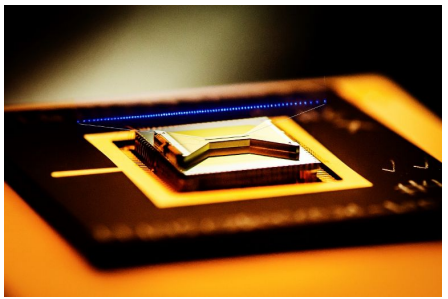




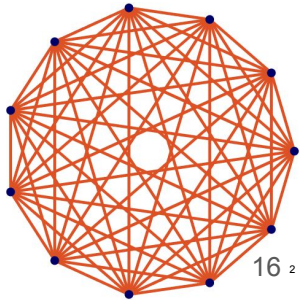
Képek forrása: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_qs_4.html

Kvantum hardware implementációk - Kvantum áramkör

- Jóval több implementáció, mint az annealing esetében:
  - IonQ
  - Oxford Quantum Circuits
  - Rigetti
  - IBM
  - Xanadu
  - Google
  - …
- IonQ:
  - Ioncsapdás implementáció
  - Kapu műveletek megvalósítása lézerekkel
  - Univerzális kapu-készlet támogatás
  - Teljesen összekapcsolt qubit-ek
  - 9, 11, …



1



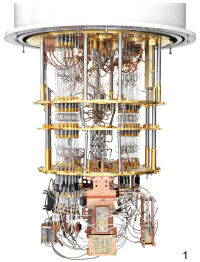
2

1 https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/ionq/
2 https://ionq.com/best-practices

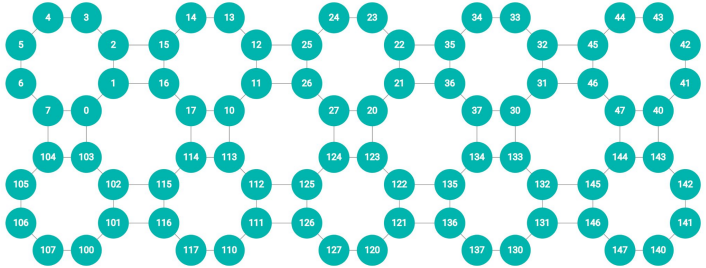
Kvantum hardware implementációk - Kvantum áramkör

ELKH Cloud | SZTAKI | Wigner | ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Rigetti:
  - Szupravezető qubit implementáció
  - Univerzális QPU, széleskörű feladatokra
  - Aspen-M-2 és Aspen-M-3 QPU-k
  - 88 qubit
  - Nem teljesen összekapcsoltak
- Oxford Quantum Circuits (OQC):
  - Szupravezető qubit implementáció
  - 8 qubit
  - Főként európai felhasználók számára



1



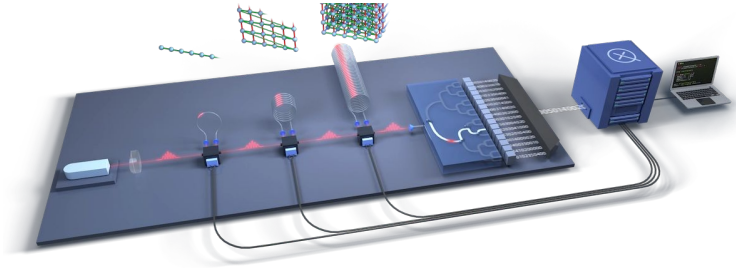
2

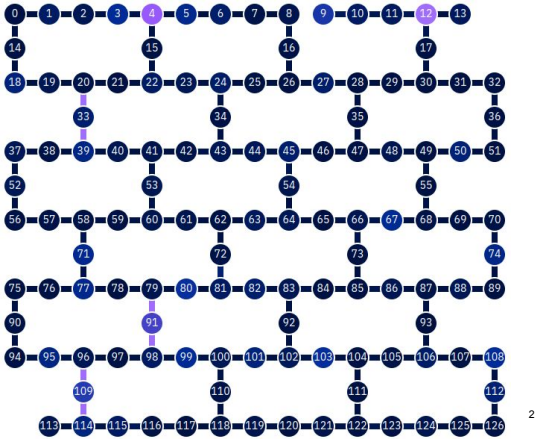
1 https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/rigetti/
2 https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/oqc/

Kvantum hardware implementációk - Kvantum áramkör

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Xanadu:
  - Optikai, fotonokat használó implementáció
  - Borealis: 216 qubit
  - Cél univerzális, hibamentes QPU készítése
  - Általános, illetve speciális kapuk támogatása
- IBM:
  - 5…127 qubit-es QPU-k (Falcon, Hummingbird, Eagle)
  - Általános kapu támogatás
  - QPU-nként változó topológia
  - Várakozási sor alapú elérés


1

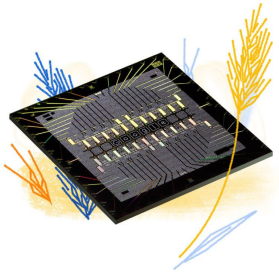


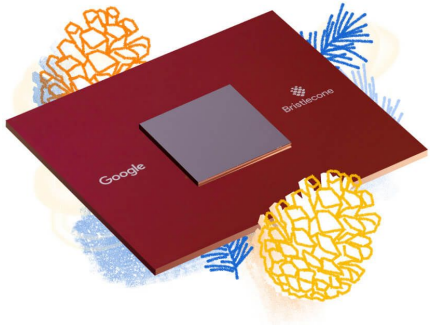
2

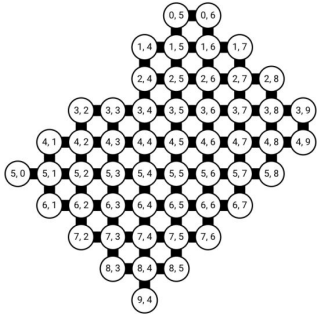
1 https://www.xanadu.ai/products/borealis
2 https://quantum-computing.ibm.com/services/resources?tab=systems&system=ibm_washington

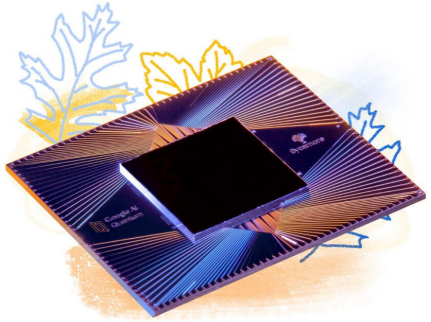
Kvantum hardware implementációk - Kvantum áramkör

- Google:
  - Foxtail, Bristlecone, végül Sycamore QPU-k
  - Sycamore: 54 szupravezető qubit implementáció
  - Univerzális
  - Egy, illetve két qubit-en operáló kapuk támogatása
  - Korlátozott hozzáférés









Képek forrása: https://quantumai.google/hardware

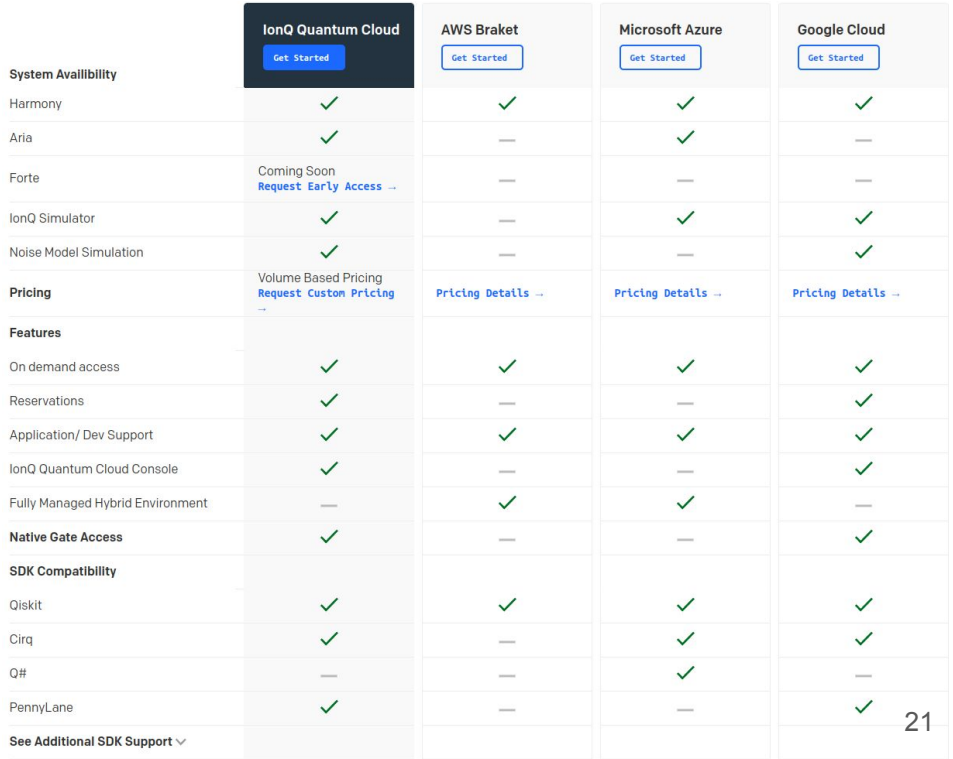
Erőforrások elérése

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Két módon: közvetlenül, illetve felhő szolgáltatón keresztül
- Közvetlen elérés:
  - Egy adott szolgáltató erőforrásai érhetőek el
  - Azonosítás a provider-től közvetlenül beszerzett autentikációs token segítségével
  - A provider által biztosított library/SDK felhasználásával fejlesztett programmal
  - Esetleg a provider webes felületén keresztül
- Felhő alapú elérés:
  - Valamilyen publikus felhő provider-en keresztül, pl. Amazon Braket
  - Azonosítás a felhőn keresztül (pl. AWS Access key, Secret key)
  - Akár többféle erőforrás elérése is biztosított (pl. vegyesen áramkör és annealing)
  - Egységes, esetleg erőforrásonként különböző library-k/SDK-k használatával

Erőforrások elérése - IonQ

- Mind közvetlen, mind felhő alapú elérés lehetséges
- Közvetlen elérés:
  - IonQ saját szolgáltatásán keresztül: https://ionq.com/quantum-cloud
- Felhő alapú elérés:
  - Microsoft Azure
  - Amazon Braket
  - Google Cloud
- Fejlesztői környezetek:
  - ProjectQ
  - Google Cirq
  - IBM Qiskit
  - Amazon Braket SDK



	IonQ Quantum Cloud (Get Started)	AWS Braket (Get Started)	Microsoft Azure (Get Started)	Google Cloud (Get Started)
System Availibility				
Harmony	✓	✓	✓	✓
Aria	✓	—	✓	—
Forte	Coming Soon Request Early Access →	—	—	—
IonQ Simulator	✓	—	✓	✓
Noise Model Simulation	✓	—	—	✓
Pricing	Volume Based Pricing Request Custom Pricing →	Pricing Details →	Pricing Details →	Pricing Details →
Features				
On demand access	✓	✓	✓	✓
Reservations	✓	—	—	✓
Application/ Dev Support	✓	✓	✓	✓
IonQ Quantum Cloud Console	✓	—	—	✓
Fully Managed Hybrid Environment	—	✓	✓	—
Native Gate Access	✓	—	—	✓
SDK Compatibility				
Qiskit	✓	✓	✓	✓
Cirq	✓	—	✓	✓
Q#	—	—	✓	—
PennyLane	✓	—	—	✓
See Additional SDK Support				

Kép forrása: https://ionq.com/quantum-cloud/#access-options

Erőforrások elérése - Rigetti

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Mind közvetlen, mind felhő alapú elérés lehetséges
- Közvetlen elérés:
  - Rigetti Quantum Cloud Services: https://qcs.rigetti.com/
- Felhő alapú elérés:
  - Microsoft Azure
  - Amazon Braket
- Fejlesztői nyelv: Quil (Quantum Instruction Language)
- Fejlesztői eszköz: Forest SDK
  - pyQuil: Quil alkalmazások fejlesztése
  - quilc: optimalizáló Quil fordító
  - QVM: szimulátor
  - Docker image elérhető

```
from pyquil import get_qc, Program
from pyquil.gates import H, CNOT, MEASURE
from pyquil.quilbase import Declare

program = Program(
    Declare("ro", "BIT", 2),
    H(0),
    CNOT(0, 1),
    MEASURE(0, ("ro", 0)),
    MEASURE(1, ("ro", 1)),
).wrap_in_numshots_loop(10)

qc = get_qc("2q-qvm")

qc.run(qc.compile(program)).readout_data.get("ro")
```

```
array([[1, 1],
       [0, 0],
       [0, 0],
       [0, 0],
       [1, 1],
       [0, 0],
       [1, 1],
       [0, 0],
       [1, 1],
       [0, 0]])
```

Képek forrása: https://docs.rigetti.com/qcs/getting-started/forest-docker-image

Erőforrások elérése - Oxford Quantum Circuits

ELKH Cloud

SZTAKI

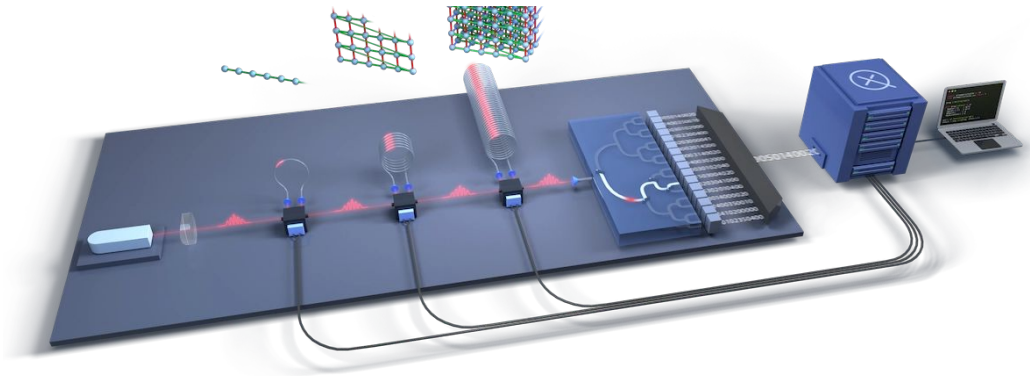
Wigner

ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Mind közvetlen, mind felhő alapú elérés lehetséges
- Közvetlen elérés:
  - Dedikált hozzáférés az OQC privát felhőjén
- Felhő alapú elérés:
  - Amazon Braket
- Fejlesztői környezet:
  - Privát elérés esetén dedikált dokumentáció és környezet
  - Amazon Braket SDK-n keresztül

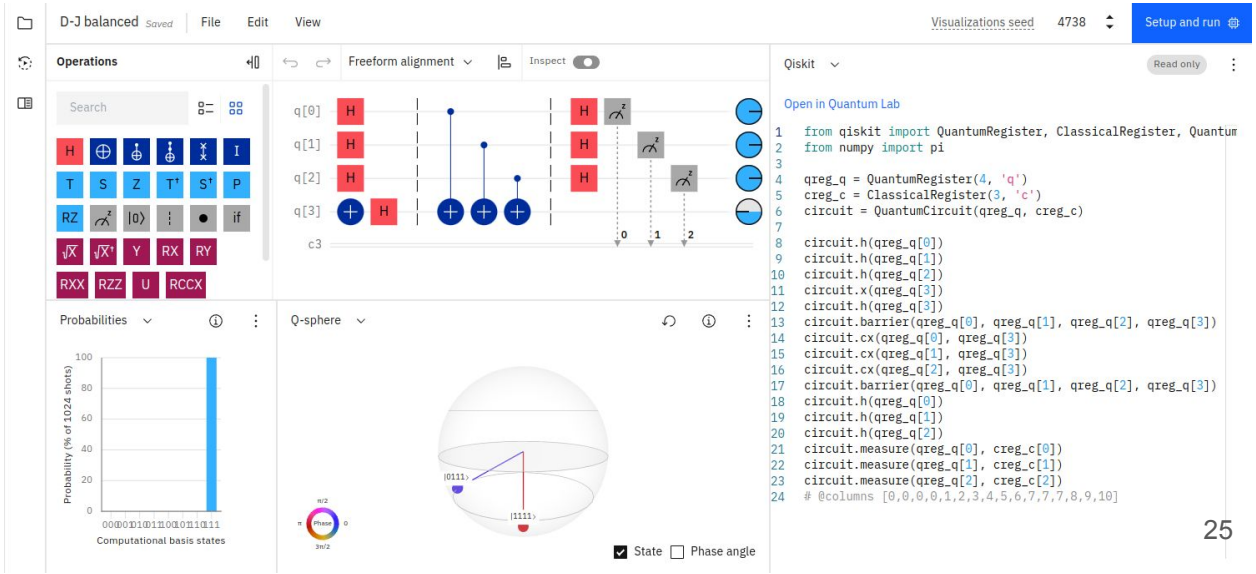
Erőforrások elérése - Xanadu

- Mind közvetlen, mind felhő alapú elérés lehetséges
- Közvetlen elérés:
  - Xanadu cloud-on keresztül: https://platform.xanadu.ai/
- Felhő alapú elérés:
  - Amazon Braket
- Fejlesztői környezet:
  - Strawberry Fields
  - Amazon Braket SDK-n keresztül



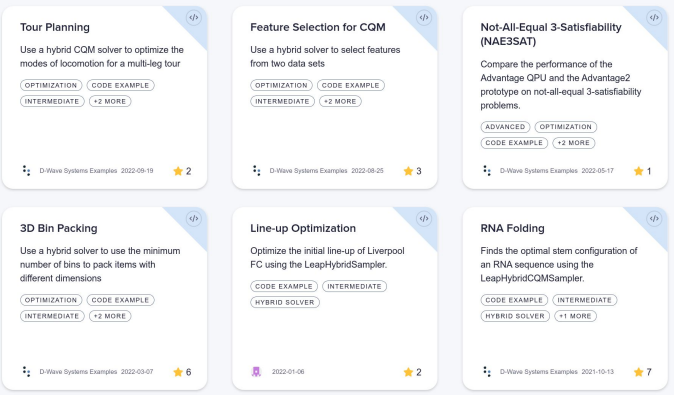
Erőforrások elérése - IBM

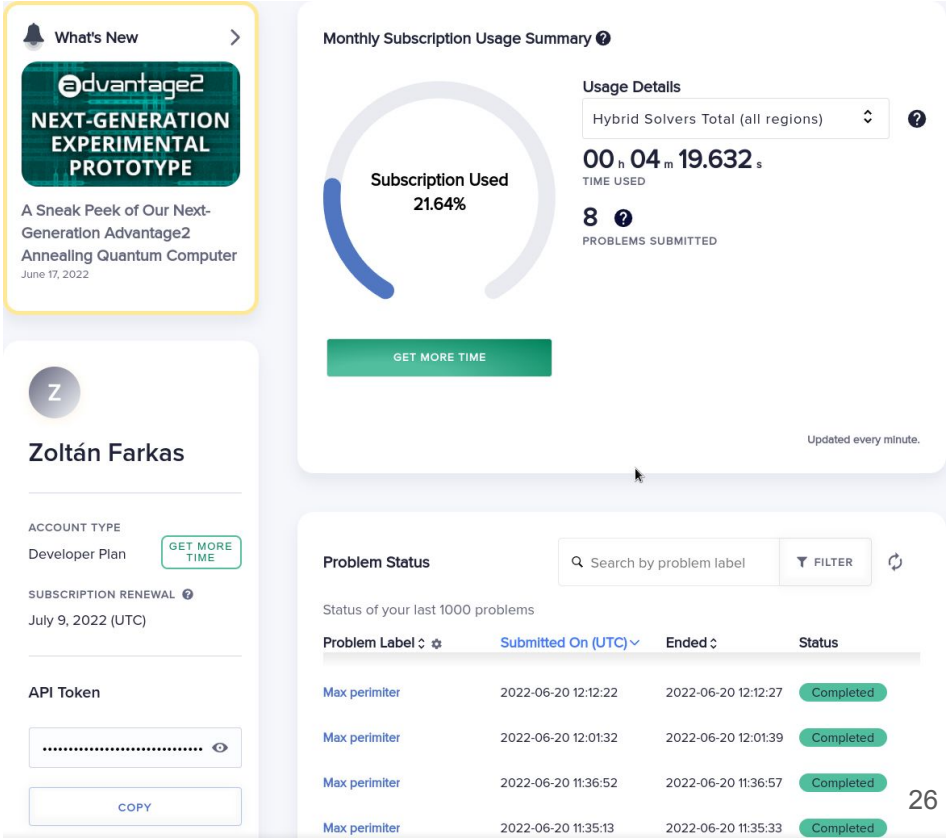
- Saját felhő szolgáltatás biztosítja a teljes körű hozzáférést:
  - https://quantum-computing.ibm.com/
- Fejlesztői környezet:
  - IBM Qiskit SDK
  - IBM Quantum Composer
  - IBM Quantum Lab
    - Interaktív fejlesztőkörnyezet



Erőforrások elérése - D-Wave

- Közvetlen elérés:
  - D-Wave Leap rendszeren keresztül: https://cloud.dwavesys.com/leap/
- Fejlesztői környezetek:
  - Ocean SDK
  - Leap: interaktív fejlesztőkörnyezet
- Bőséges példahalmaz





Képek forrása: https://cloud.dwavesys.com/leap/examples, https://cloud.dwavesys.com/leap/

Erőforrások elérése - Amazon Braket

ELKH Cloud | SZTAKI | Wigner | ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Felhő alapú hozzáférést biztosít számos kvantum erőforráshoz:
  - IonQ
  - Oxford Quantum Circuits
  - Rigetti
  - …
- Fejlesztői eszközök:
  - Interaktív Jupyter Notebook-ok
  - Amazon Braket SDK

IONQ

IonQ trapped-ion quantum computers are universal, gate-based machines using ionized ytterbium atoms. Two internal states of these identical atoms make up the qubits. The execution of computational tasks is accomplished by programming the sequence of laser pulses used to implement each quantum gate operation.

Learn more »

OQC

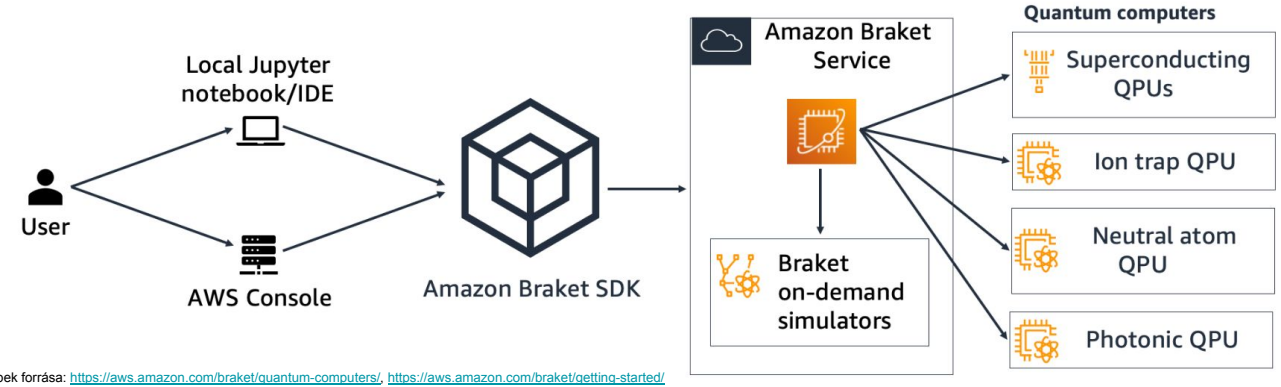
Oxford Quantum Circuits (OQC) quantum computers are universal, gate-based machines based on superconducting qubits built using proprietary 'Coaxmon' technology. The Coaxmon design has a scalable, three-dimensional architecture that introduces the qubit control electronics perpendicular to the plane of the qubits.

Learn more »

QuEra Computing Inc.

QuEra quantum computers are based on Rydberg atom qubits, which utilize internal states of individual Rubidium atoms that are trapped and manipulated using laser beams. QuEra quantum computers can simulate the behavior of other quantum systems through analog Hamiltonian simulation.

Learn more »

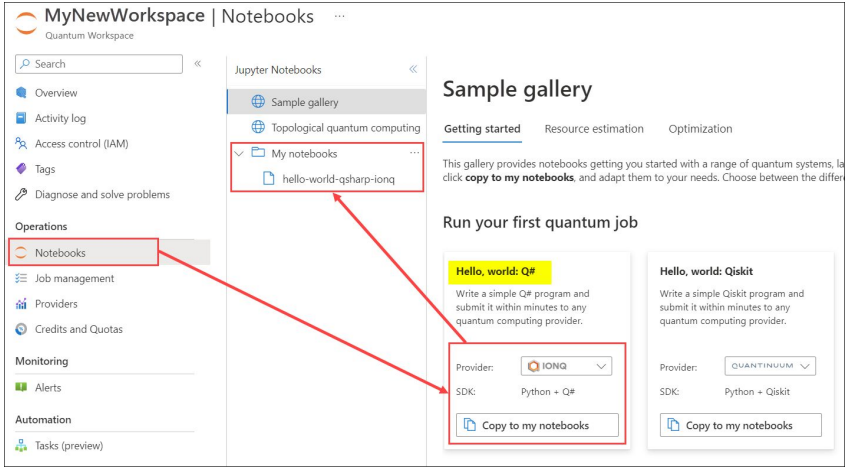


Képek forrása: https://aws.amazon.com/braket/quantum-computers/, https://aws.amazon.com/braket/getting-started/

Erőforrások elérése - Microsoft Quantum

ELKH Cloud | SZTAKI | Wigner | ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Felhő alapú hozzáférés számos erőforráshoz, pl.:
  - IonQ
  - Rigetti
  - Quantinuum
  - Pasqal
- Fejlesztői eszközök:
  - Azure Quantum Workspace-en belül, vagy lokális környezetben
  - Microsoft Quantum Development Kit
  - Ezen belül Q#: a kvantumáramkörök programozására használt nyelv
  - IBM Qiskit, Google Cirq támogatás



Kép forrása: https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/get-started-jupyter-notebook

Erőforrások elérése - Google - Cirq

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Python alapú SDK kvantumáramkörök fejlesztéséhez, futtatásához
- Kvantumáramkörök építése:
  - Kvantumbiteken operáló kapukból álló áramkörök építését segíti elő
  - Lehetőséget biztosít az áramkörök darabolására, és összeillesztésére, így támogatva a lehetséges optimalizációt
- Eszközök támogatása:
  - A Google Quantum Computing Service-en keresztül elérhető kvantumgépek használhatóak
- Szimuláció:
  - A Cirq beépített szimulátor eszközökkel rendelkezik
  - Hullámfüggvényekre és sűrűségi mátrixokra alapoznak
  - Támogatja a qsim-et, egy optimalizált kvantumáramkör szimulátort
  - QVM: Quantum Virtual Machine támogatás

Fejlesztőkörnyezet - Cirq - Hardware elérés

- Alpine Quantum Technologies (AQT):
  - Segítségével több kvantum erőforráshoz férhetünk hozzá
  - Szimulátor erőforrás regisztráció után azonnal igényelhető
  - Kvantumgéphez való hozzáférés csak egy éves regisztrációkkal érhető el
  - Konfiguráció részletei: https://quantumai.google/cirq/hardware/aqt/access
- Azure Quantum:
  - Kétféle kvantum erőforráshoz való hozzáférés érhető el: Honeywell, IonQ erőforrások
  - Azure Quantum Workspace létrehozására szükséges
  - Lehetőség van ingyenesen használatra
  - Cirq-ből való használat feltétele egy kiegészítő Python csomag (azure-quantum[cirq]) telepítése
  - Konfiguráció, beállítás részletei: https://quantumai.google/cirq/hardware/azure-quantum/access
- IonQ:
  - Közvetlenül is van lehetőség az IonQ erőforrásainak használatára
  - Autentikációs adatok konfigurációja után használható az erőforrás
  - Konfiguráció részletei: https://quantumai.google/cirq/hardware/ionq/access
- Pasqual:
  - Publikusan nem elérhető az API végfelhasználók számára
- Rigetti:
  - Számos függőség telepítését igényli
  - Telepítési, használati dokumentáció: https://quantumai.google/cirq/hardware/rigetti/getting_started

Szimulációs lehetőségek

- IonQ: 29 qubit-es szimulátor az IonQ Quantum Cloud-on belül
- Rigetti: QVM - Quantum Virtual Machine
- Oxford Quantum Circuits: -
- Xanadu: a Strawberry Fields-be integrált szimulátor elérhető
- IBM: Qiskit SDK-ba épített, illetve felhő alapú szimulátorok elérhetőek
- D-Wave: Ocean SDK-ba épített szimulátorok használhatóak
- Amazon Braket: SDK-ból hívható lokálisan (saját gépen), illetve felhőben (AWS infrastruktúrán) futó szimulátorok elérhetőek
- Microsoft Quantum: lokálisan, illetve felhőben futó szimulátor szolgáltatások elérhetőek

Kiegészítő könyvtárak

- Valamilyen speciális problémakör kvantum szemléletű támogatására
- PennyLane:
  - Gépi tanulást támogató keretrendszerek és kvantumszámítás összekapcsolása
- Qiskit:
  - Qiskit Machine Learning: gépi tanulás támogatása (kvantum kernelek, kvantum neurális hálók)
  - Qiskit Finance: pénzügyi problémák támogatása
  - Qiskit Optimization: optimalizációs problémák
  - Qiskit Nature: kvantummechanikával kapcsolatos természettudományos problémák
- Strawberry fields:
  - Gráf- és hálózati problémák
  - Gépi tanulás
  - Kémiai rendszerek

Kiegészítő könyvtárak - PennyLane

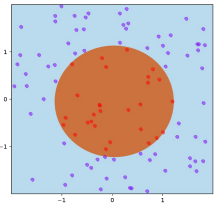
- Cross-platform könyvtár kvantumgépek programozásához
- A differenciálprogramozhatósága lehetővé teszi kvantumáramkörök végrehajtását és tanítását különböző backend rendszereken
- Alapvető koncepciója a gépi tanulást támogató keresztrendszerek és a kvantumszámítás összekapcsolása (NumPy, PyTorch, Tensorflow)
- Fő feladata a kvantumszámítások végrehajtása, és azok eredményének átadása a fenti klasszikus keretrendszereknek
- Igyekszik általános lenni: módosítások nélkül lehessen végrehajtani egy adott kódot akár több eszközön is
- Python csomag: `pennylane`

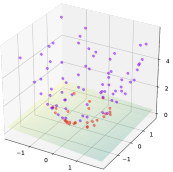
```python
import pennylane as qml
from pennylane import numpy as np

# create a quantum device
dev1 = qml.device("default.qubit", wires=1)

@qml.qnode(dev1)
def circuit(phi1, phi2):
  # a quantum node
  qml.RX(phi1, wires=0)
  qml.RY(phi2, wires=0)
  return qml.expval(qml.PauliZ(0))

def cost(x, y):
  # classical processing
  return np.sin(np.abs(circuit(x, y))) - 1

# calculate the gradient
dcost = qml.grad(cost, argnum=[0, 1])
```

Kép forrása: https://pennylane.ai/

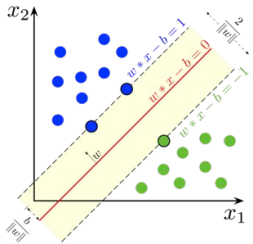
Kiegészítő könyvtárak - Qiskit Machine Learning

- Alapvető, gépi tanulást támogató számítási építőkockákat biztosít, pl.:
  - Kvantum kernelek
  - Kvantum neurális hálók
- Ezek később olyan területeken alkalmazhatók, mint:
  - Klasszifikációs problémák
  - Regressziós feladatok





- Példák: https://qiskit.org/documentation/machine-learning/tutorials/index.html
- Kvantum kernelek:
  - Céljuk az adatpontok magasabb dimenzióba történő konvertálása, a könnyebb megértés érdekében
  - Az adott osztály segíti adott adatpontokhoz tartozó kernel mátrixok könnyű kiszámítását
  - Ezek aztán klasszifikációs (QSVC) és regressziós (QSVR) algoritmusokban könnyedén felhasználhatóak
- Qiskit Runtime segítségével futtathatóak:
  - Komplexebb algoritmusok végrehajtására használható

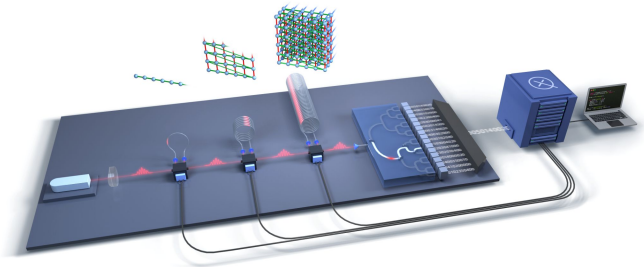


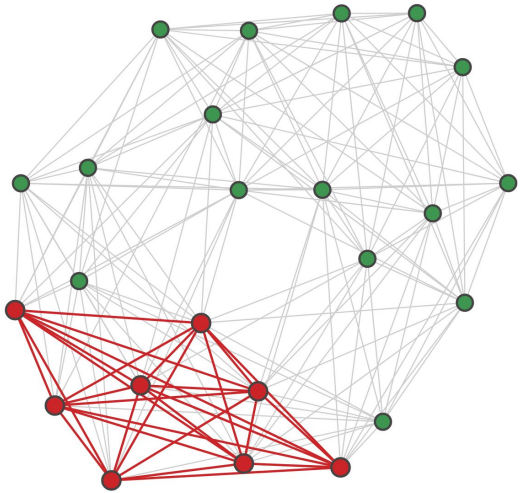
Képek forrása: https://en.wikipedia.org/wiki/Support_vector_machine

Kiegészítő könyvtárak - Strawberry Fields

ELKH Cloud SZTAKI Wigner ELKH Eötvös Loránd Research Network

- Alapvetően a Xanadu által biztosított QPU-k használatára fókuszál
- Fotonikus kvantum algoritmusok futtatása
- Gráf- és hálózat-optimalizációs feladatok, gépi tanulás, kémiai modellek támogatása
- Részletesen paraméterezhető szimulációs eszközök



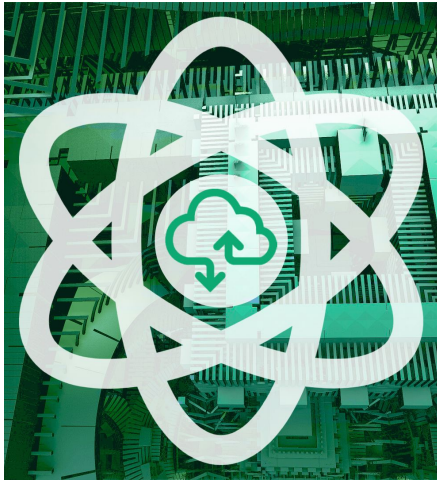


```python
import strawberryfields as sf
from strawberryfields.ops import *

prog = sf.Program(2)

with prog.context as q:
  Sgate(1.0)  | q[0]
  Sgate(-1.0) | q[1]
  BSgate()    | q
  Measure     | q

eng = sf.LocalEngine(backend='gaussian')
results = eng.run(prog)
```

Képek forrása: https://strawberryfields.ai/

Összefoglalás

- A kvantum erőforrások elérhető közelségbe kerültek
- Számos implementáció elérhető
  - Annealing
  - Kvantumáramkör
- Ezek mind saját fejlesztőeszközzel használhatóak
  - Ocean SDK
  - IBM Qiskit
  - Google Cirq
  - …
- Részletes dokumentációs elérhetőek
- Probléma-specifikus eszközök is rendelkezésre állnak
  - PennyLane
  - Qiskit ML, Nature
  - …
- Könnyebb hozzáférés: ELKH Cloud kvantum referencia architektúra



ELKH
Eötvös Loránd
Research Network

Köszönöm a figyelmet!

www.elkh.org