



Introduzione al Quantum Computing

Esempi e applicazioni al CERN



QUANTUM
TECHNOLOGY
INITIATIVE

Sofia Vallecorsa

AI and Quantum Research - CERN openlab

CERN

Sommario

- Introduzione e la Quantum Technology Initiative al CERN
- Concetti fondamentali e algoritmi
- NISQ hardware
- Approccio quantistico al Machine Learning
 - Esempi e applicazioni al CERN

Due corsi recenti al CERN (pubblici):

E. Combarro: A practical introduction to Quantum Computing. <https://indico.cern.ch/event/970903/>

H. Gray: Introduction to Quantum Computing. <https://indico.cern.ch/event/870515/>

CERN

“Science for peace”

Organizzazione Internazionale a Ginevra, sul confine franco-svizzero, fondata nel 1954.

Laboratorio per la ricerca fondamentale in fisica delle particelle.

23 Stati Membri, budget ~ 1.1 B CHF

~3'200 staff, fellows, trainees, ...

>13'000 associates

1954: 12 Member States

Members: Austria, Belgium, Bulgaria, Czech republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom

Candidate for membership: Cyprus, Slovenia

Associate members: Croatia, India, Lithuania, Pakistan, Turkey, Ukraine

Observers: EC, Japan, JINR, Russia, UNESCO, United States of America

Numerous **non-member states with collaboration agreement**

>2'500 staff members, 645 fellows, 21 trainees

7'000 member states, 1'800 USA, 900 Russia, 270 Japan, ...

Quantum Technology Initiative al CERN

Il CERN lancia la QTI nel 2020

- Roadmap pubblicata nel 2021
- Disponibile su Zenodo: consultata piu' di **5700 volte**



T1 – Progetti ricerca tecnico-scientifica

T2 – Co-sviluppo



T3 – Creazione di una comunità di esperti

T4 – Integrazione all'interno di progetti e iniziative nazionali e internazionali

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5553774>

Obiettivi scientifici



- Identificare aree in fisica delle particelle in cui **ottenere vantaggio** dall'uso di algoritmi quantistici
- Sviluppare librerie, metodi, software e strumenti di validazione
- Contribuire allo sviluppo di piattaforme e infrastrutture **ibride (classico-quantistiche) condivise**

Computing & Algoritmi



- Sviluppo di tecniche di **simulazione** quantistica applicabili alla fisica delle particelle
- Modellizzazione teorica delle aree di **sviluppo condiviso** tra quantum computing e quantum sensing

Teoria e Simulazione



- Creazione di una base di **competenze in tecniche di rivelatori basate su fenomeni quantistici** in applicazioni di fisica di bassa e alta energia
- Valutazione di nuove tecnologie e materiali per applicazioni in fisica

Metrologia, rivelatori e materiali



- **Cosviluppo** di tecnologie presenti al CERN e rilevanti per **l'infrastruttura quantistica** (sincronizzazione temporale, lasers,...)
- Sviluppo e validazione di **infrastruttura** quantistica
- Valutazione di requisiti e impatto della **comunicazione quantistica** su applicazioni computazionali (sicurezza, privacy)

Comunicazione & Reti

Vantaggio quantistico?

Nel 2019, **Google** annuncia **vantaggio quantistico** su un problema di campionamento: soluzione ottenuta in 200s sul computer quantistico “Sycamore” rispetto a un tempo stimato di 10000 anni sul supercomputer classico “Summit”

Nel 2020, ricercatori al **Hefei National Lab, Cina**, osservano **vantaggio** su un altro problema di campionamento usando un computer fotonico.

Il concetto di supremazia quantistica si riferisce a computer quantistici che “.. Possono risolvere problemi irrisolvibili su computer classici, indipendentemente dal fatto che i problemi siano realistici o meno.”
(John Preskill, Caltech)

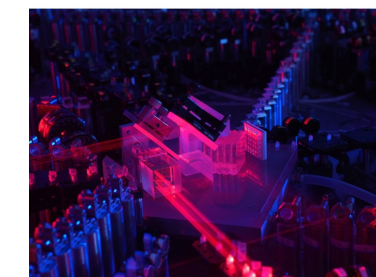
Un vantaggio quantistico “pratico”
”Risolvere un problema che sia utile al mondo scientifico o industriale meglio o più velocemente di qualunque algoritmo classico conosciuto su hardware classico”
(M. Troyer, Microsoft)

<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>



Physicists in China challenge Google's 'quantum advantage'

Photon-based quantum computer does a calculation that ordinary computers might never be able to do.



His photonic computer performed in 200 seconds a calculation that on an ordinary supercomputer could take 2.5 billion years to complete. Credit: Hansen Zhong

<https://www.nature.com/articles/d41586-020-03434-7>

Classical Simulation of Quantum Supremacy Circuits

Cupjin Huang,¹ Fang Zhang,² Michael Newman,³ Junjie Cai,⁴
Xun Gao,¹ Zhengxiong Tian,⁵ Junyin Wu,⁴ Haihong Xu,⁵ Huanjun Yu,⁵
Bo Yuan,⁶ Mario Szegedy,¹ Yaoyun Shi¹, Jianxin Chen¹

¹Alibaba Quantum Laboratory,

Alibaba Group USA, Bellevue, WA 98004, USA

²Department of Electrical Engineering and Computer Science,
University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA

³Departments of Physics and Electrical and Computer Engineering,
Duke University, Durham, NC 27708, USA

⁴Alibaba Cloud Intelligence,

Alibaba Group USA, Bellevue, WA 98004, USA

⁵Alibaba Cloud Intelligence,

Alibaba Group, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

⁶Alibaba Infrastructure Service,

Alibaba Group, Hangzhou, Zhejiang 310000, China

Abstract

It is believed that random quantum circuits are difficult to simulate classically. These have been used to demonstrate quantum supremacy: the execution of a computational task on a quantum computer that is infeasible for any classical computer. The task underlying the assertion of quantum supremacy by Arute *et al.* (*Nature*, **574**, 505–510 (2019)) was initially estimated to require Summit, the world's most powerful supercomputer today, approximately 10,000 years. The same task was performed on the Sycamore quantum processor in only 200 seconds.

In this work, we present a tensor network-based classical simulation algorithm. Using a Summit-comparable cluster, we estimate that our simulator can perform this task in less than 20 days. On moderately-sized instances, we reduce the runtime from years to minutes, running several times faster than Sycamore itself. These estimates are based on explicit simulations of parallel subtasks, and leave no room for hidden costs. The simulator's key ingredient is identifying and optimizing the “stem” of the computation, a sequence of noisy

arXiv:2005.06787v1 [quant-ph] 14 May 2020

Le promesse...

- Accelerazione esponenziale
 - Campionamento efficiente, **ricerche di database** and **problemi di ottimizzazione**
 - Algebra lineare, matrici e machine learning
- Nuovi algoritmi e metodi per la **crittografia** e la **comunicazione**
- **Simulazione diretta** di sistemi quantistici

Un nodo QKD (Quantum Key Distribution) per la comunicazione crittografata al CERN



<https://arxiv.org/pdf/1203.4940.pdf>

... e le sfide

- **Soluzioni ingegneristiche** per I/O, raffreddamento, etc..
- Connettività limitata tra i qubit
- **Decoerenza** e vita media del qubit limitata
- **Rumore**
 - Una misura **modifica intrinsecamente** il sistema quantistico
 - Si generano **errori** che devono essere corretti o mitigati attraverso tecniche specifiche
- Equi parametri di **riferimento e confronto** con gli approcci classici

Image: IBM Q

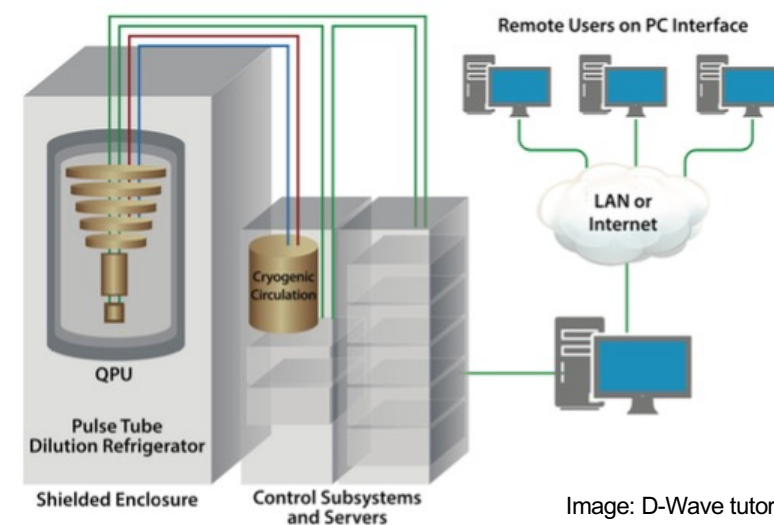
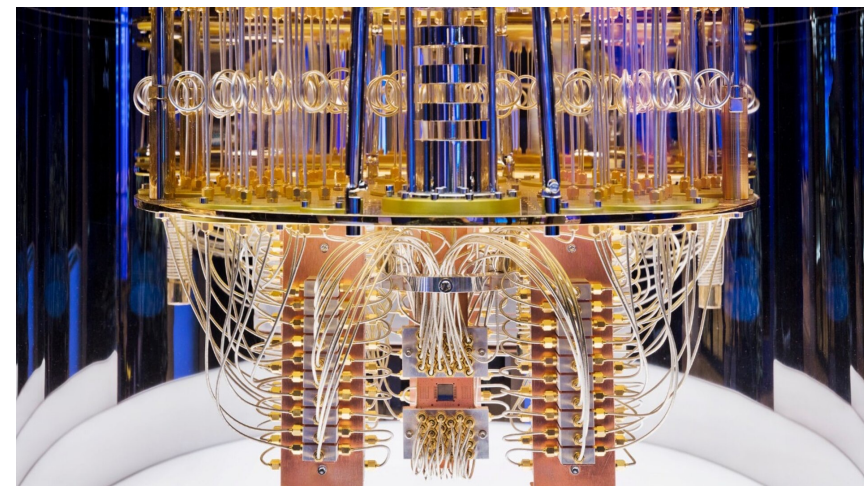
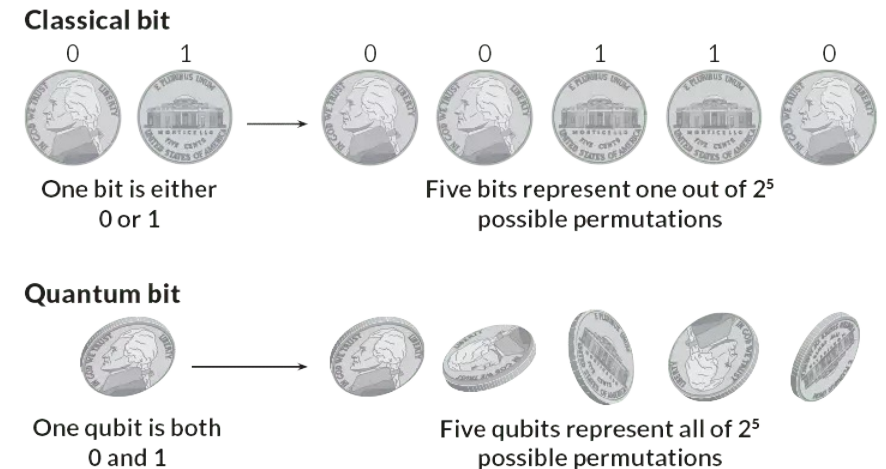


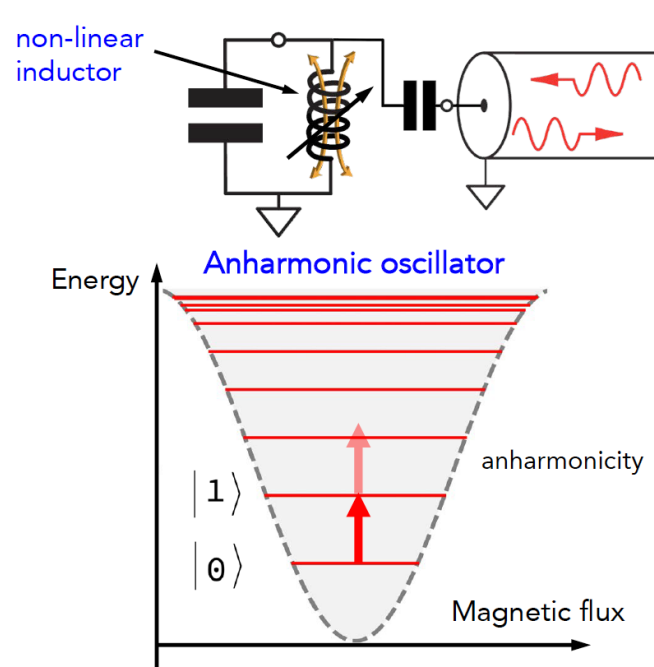
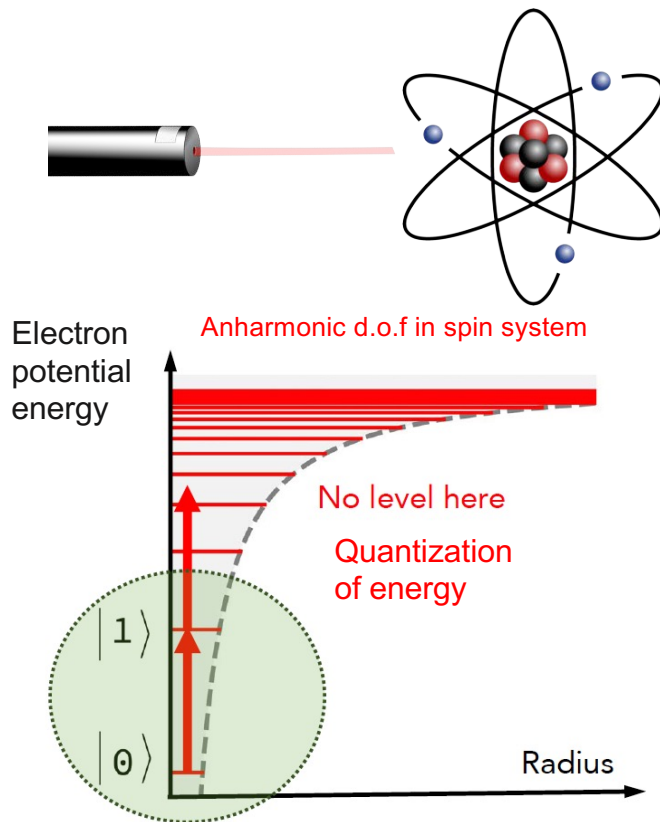
Image: D-Wave tutorial

Qubit: Quantum bit

- **Bit classico** assume valori binari (0 o 1)
 - Nella meccanica quantistica uno stato è rappresentato da una **sovrapposizione**: simultaneamente in 0 e 1
- **Il principio di sovrapposizione** permette la computazione su una serie di stati in parallelo (**accelerazione esponenziale**)
- Ma il risultato di una operazione, rappresentato dallo stato di un qubit deve essere misurato
 - **Il qubit collassa e il risultato della misura è random**
- **Qubit non possono essere copiati**



Creare qubit: anelli superconduttori



Z. Mineev, Qiskit Global Summer School 2020

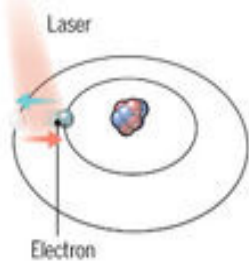
- In un circuito a resistenza nulla, la corrente oscilla all'interno dell'anello
- Iniettando un segnale a micro-onde è possibile eccitare la corrente in una sovrapposizione di stati

Ex. Google, IBM, ...



Esistono diverse tecnologie

Trapped ions



Electrically charged atoms, or ions, have quantum energies that depend on the location of electrons. Tuned lasers cool and trap the ions, and put them in superposition states.

Longevity (seconds) >1000

Logic success rate 99.9%

Number entangled 14

Company support

IonQ

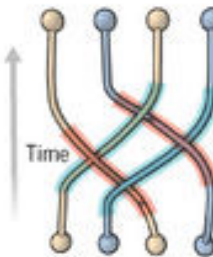
Pros

Very stable. Highest achieved gate fidelities.

Cons

Slow operation. Many lasers are needed.

Topological qubits



Quasiparticles can be seen in the behavior of electrons channeled through semiconductor structures. Their braided paths can encode quantum information.

Longevity (seconds) N/A

Logic success rate N/A

Number entangled N/A

Company support

Microsoft, Bell Labs

Pros

Greatly reduce errors.

Cons

Existence not yet confirmed.

Silicon quantum dots



These "artificial atoms" are made by adding an electron to a small piece of pure silicon. Microwaves control the electron's quantum state.

Longevity (seconds) 0.03

Logic success rate ~99%

Number entangled 2

Company support

Intel

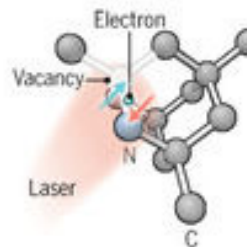
Pros

Stable. Build on existing semiconductor industry.

Cons

Only a few entangled. Must be kept cold.

Diamond vacancies



A nitrogen atom and a vacancy add an electron to a diamond lattice. Its quantum spin state, along with those of nearby carbon nuclei, can be controlled with light.

Longevity (seconds) 10

Logic success rate 99.2%

Number entangled 6

Company support

Quantum Diamond Technologies

Pros

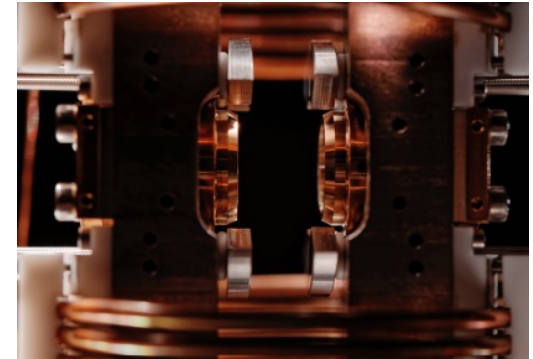
Can operate at room temperature.

Cons

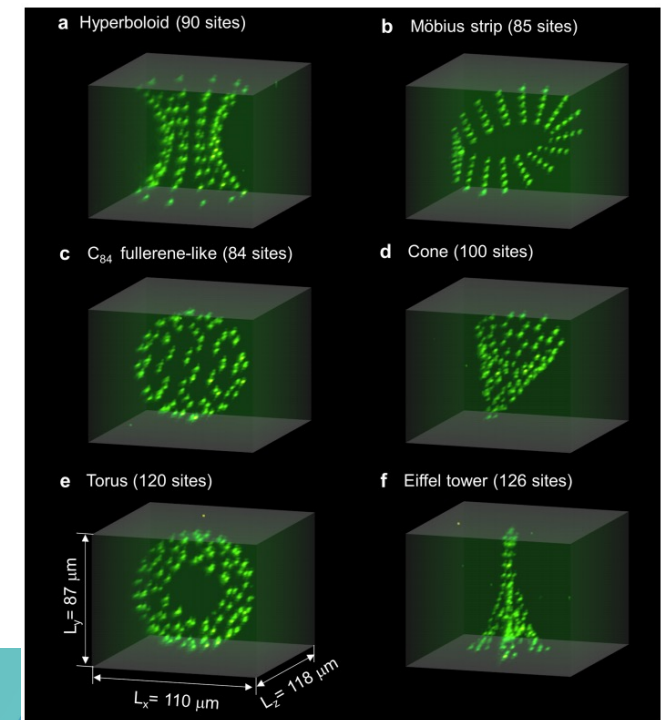
Difficult to entangle.

Serie di atomi neutri

- **Singoli atomi neutri** possono essere organizzati in serie riconfigurabili
 - **Processori quantistici programmabili**
- Gli stati del qubit sono rappresentati da due livelli di energia
- Lo stato e la posizione degli atomi è controllata da **laser**
 - È possibile configurare e leggere registri fatti da **centinaia di qubits**
- **Alto numero di connessioni tra i qubit**
- **Necesario definire cicli completi di computazione perchè i registri non sono permanenti**
 - Preparazione dei registri
 - Processamento
 - Lettura del risultato dal registro di qubit

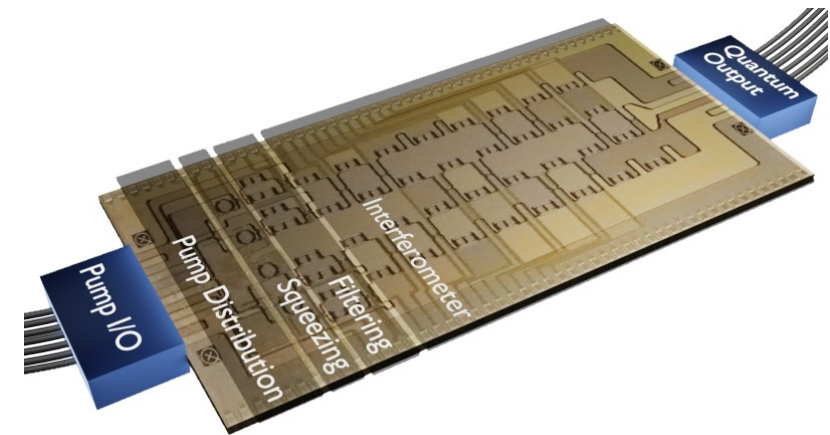


D. Barredo et al., "Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom." [arXiv:1712.02727](https://arxiv.org/abs/1712.02727), 2017.



Computer a tecnologia fotonica

- Sistemi di **fotoni** in stati di sovrapposizione in un risonatore fotonico generati da impulsi laser (squeezed states)
- **La catena di operazioni è implementata usando una serie di interferometri** (phase shifters and beam splitters)
- Durante la fase di lettura, i fotoni sono misurati attraverso **contatori superconduttori**
- Rappresentazione naturale delle **variabili continue**



<https://strawberryfields.ai/photronics/hardware/details.html>
<https://youtu.be/v7iAqcFCTQQ>



La rappresentazione di un qubit

- **La notazione di Dirac** si usa per descrivere gli stati quantistici

- Data una base di vettori ortogonali

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

- Si può definire un vettore bidimensionale nello spazio complesso

$$\alpha, \beta \in \mathbb{C}^2 \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

- Lo stato di un qubit si rappresenta come:

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

Un punto sulla superficie della **sfera di Bloch**

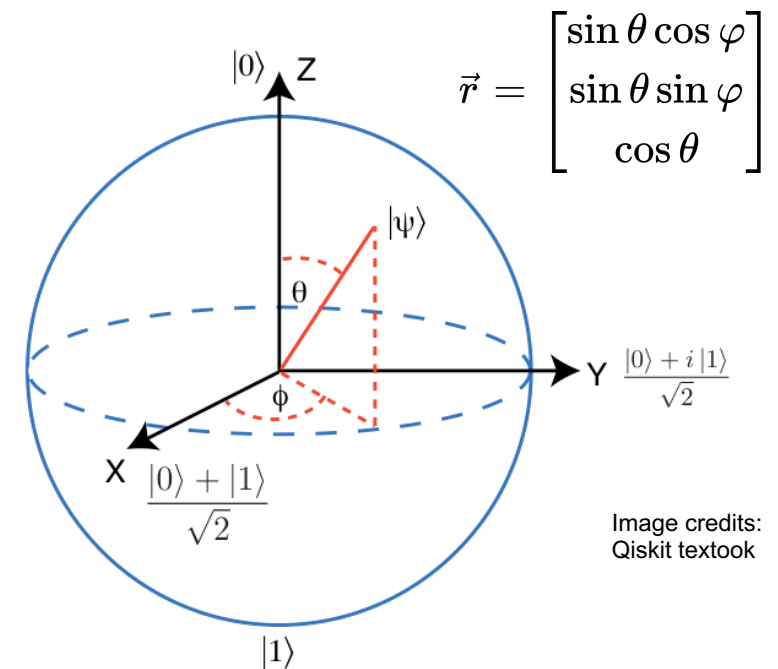


Image credits:
Qiskit textbook

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

Gate quantistici

- L'evoluzione di uno stato quantistico isolato segue l'equazione di **Schrodinger**
- Le operazioni su qubit sono definite come matrici **unitarie**
 - **Reversibili**
 - Stati di input e output hanno le stesse dimensioni
 - Alcuni gate classici (or, and, nand, xor...) **non hanno corrispettivo quantistico diretto**
 - Ma è possibile **riprodurre** qualunque computazione classica aggiungendo overhead

$$H(t)|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

$$UU^\dagger = U^\dagger U = I$$

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

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a\alpha + b\beta \\ c\alpha + d\beta \end{pmatrix}$$

$$|(a\alpha + b\beta)|^2 + |(c\alpha + d\beta)|^2 = 1$$

Esempi

The H or Hadamard gate

- The H or Hadamard gate is defined by the (unitary) matrix

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

- Its action is

$$|0\rangle \xrightarrow{H} \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|1\rangle \xrightarrow{H} \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

- We usually denote

$$|+\rangle := \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|-\rangle := \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

The Z gate

- The Z gate is defined by the (unitary) matrix

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

- Its action is

$$|0\rangle \xrightarrow{Z} |0\rangle$$

$$|1\rangle \xrightarrow{Z} -|1\rangle$$

The X or NOT gate

- The X gate is defined by the (unitary) matrix

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

- Its action (in quantum circuit notation) is

$$|0\rangle \xrightarrow{X} |1\rangle$$

$$|1\rangle \xrightarrow{X} |0\rangle$$

that is, it acts like the classical NOT gate

- On a general qubit its action is

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \xrightarrow{X} \beta|0\rangle + \alpha|1\rangle$$

Other important gates

- Y gate

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

- S gate

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix}$$

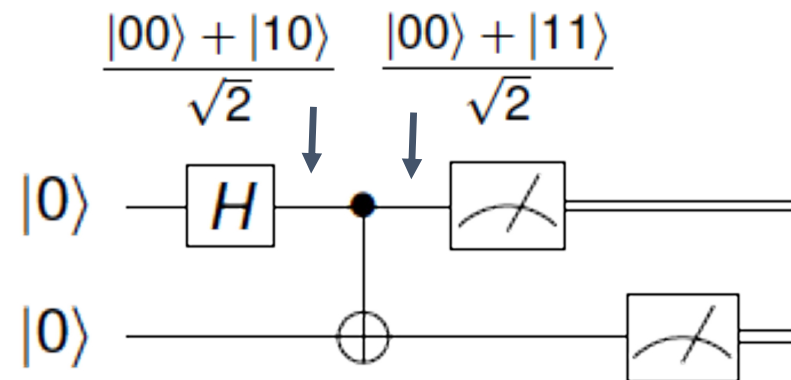
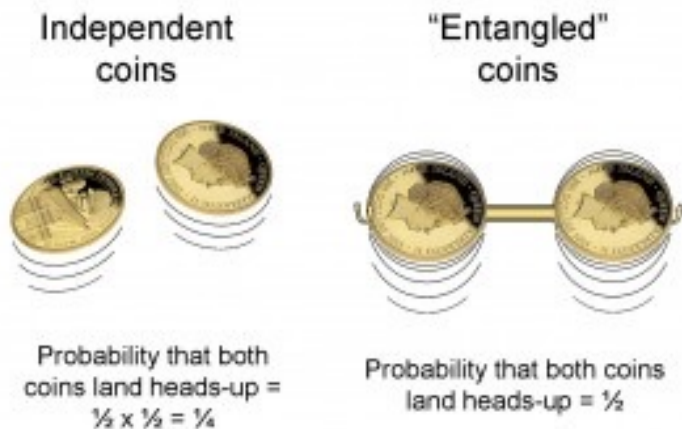
- T gate

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix}$$

- The gates X , Y and Z are also called, together with the identity, the Pauli gates. An alternative notation is σ_X , σ_Y , σ_Z .

Correlazione quantistica (entanglement)

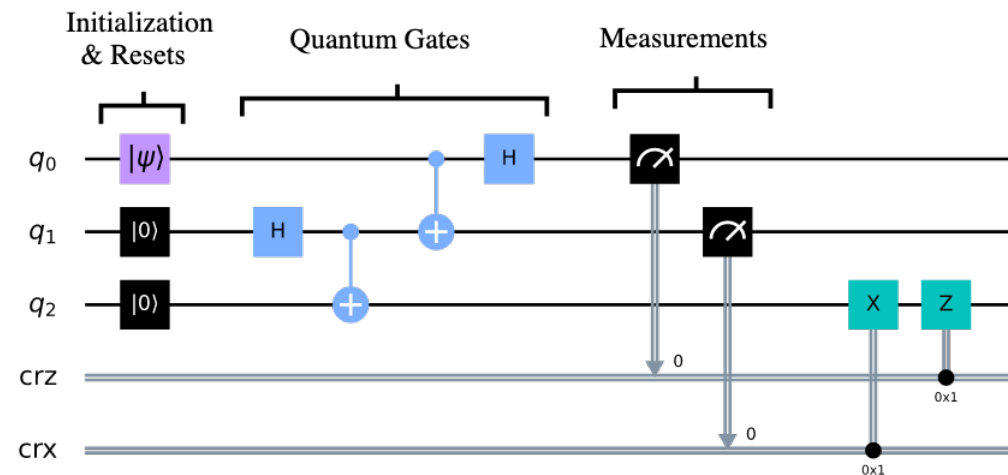
- **La correlazione quantistica** permette a due qubit, che avrebbero un comportamento random, di essere perfettamente correlati tra loro
- Example : Bell state



Circuiti Quantistici

I circuiti classici combinano operazioni logiche come **and**, **or**, **not**, **nand**, and **xor**

I circuiti quantistici usano **gate reversibili** che cambiano lo stato di uno, due o più qubit.

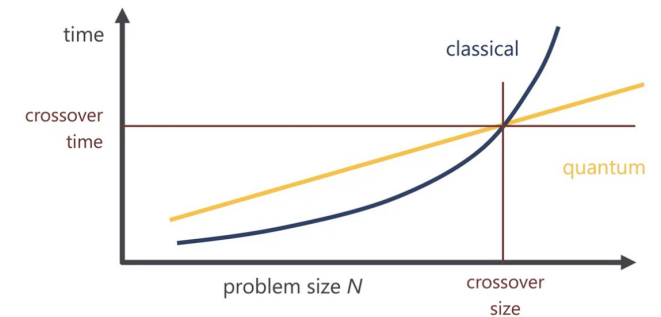


Ex. Qiskit Textbook

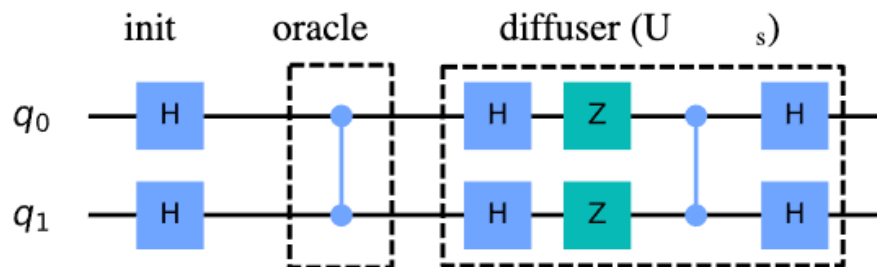
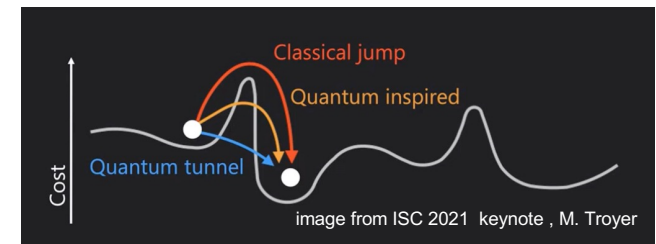
Algoritmi

Una collezione disponibile su <http://quantumalgorithmzoo.org>

- Algoritmo di Shor per la **fattorizzazione dei numeri primi**
- Algoritmo di Grover per ricerche in database non ordinati
- **Trasformate di Fourier quantistiche**
- ...
- Algoritmi ispirati alla computazione quantistica (emulano effetti quantistici su hardware classico)



Performance and complexity:
<https://www.quantum-bits.org/?p=1988>



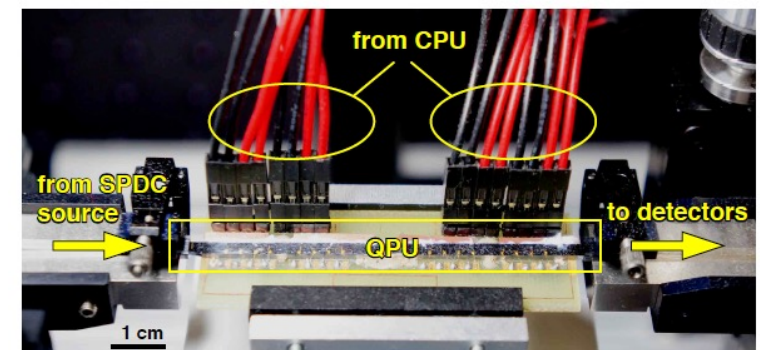
Grover algorithm
[Qiskit Textbook](#)

Dispositivi NISQ

- **Noisy Intermediate-Scale Quantum devices**
- I dispositivi attuali hanno limitazioni in termini di **stabilità** e **connettività**
- **Decoerenze**, errori di misura e al livello dei gate (**noise**)
 - Necessarie tecniche per mitigare **errori**
 - **Ottimizzazione dei circuiti rispetto all'hardware specifico**
 - Preferenza di algoritmi piu' **resistenti al rumore** (algoritmi variazionali, quantum machine learning, ...)
- Computer quantistici inizialmente integrati in una **infrastruttura ibrida**
 - Algoritmi ibridi, QPU come altri acceleratori classici (GPU, TPU, FPGA, etc..)

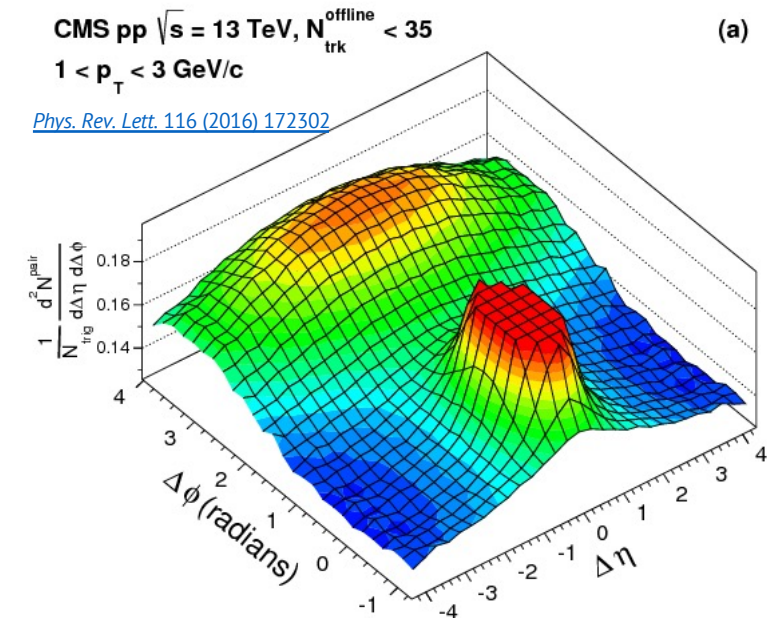
A variational eigenvalue solver on a quantum processor

[Peruzzo et al., 2013](#)



Quantum Computing nella fisica delle particelle

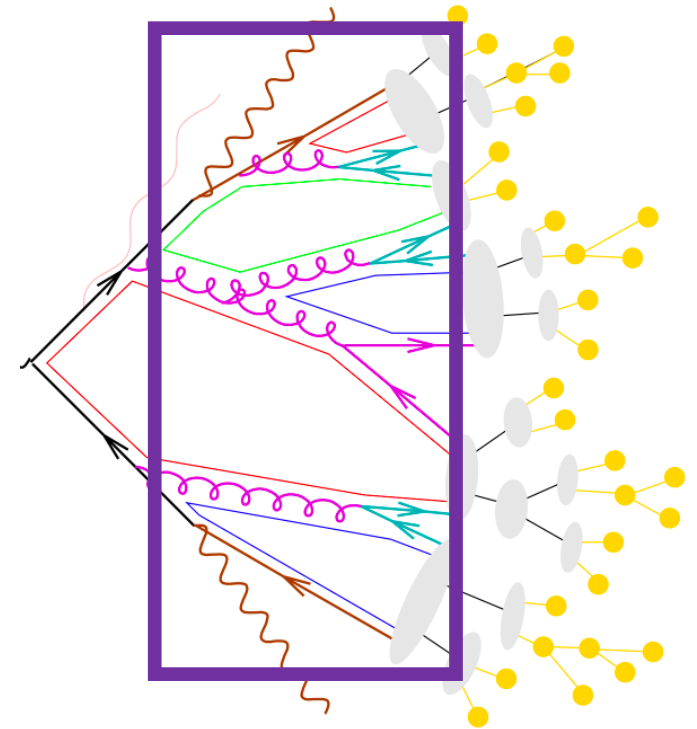
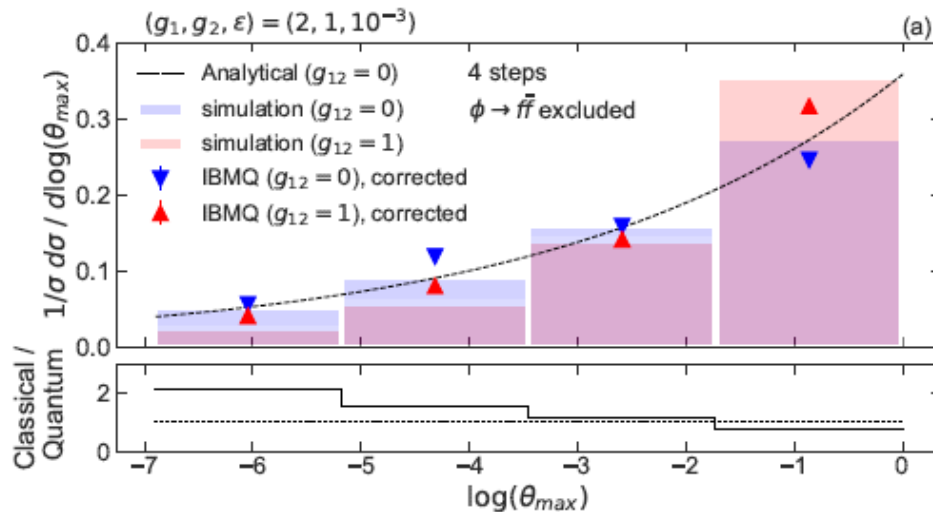
- I **dati sperimentali** sono generati da **processi quantistici**
- **Correlazioni quantistiche** tra le particelle sono normalmente studiate attraverso risultati di misure (dati classici)
- Ma queste correlazioni sono una **diretta conseguenza** delle leggi della **Teoria Quantistica dei Campi**



E' possibile **dedurre naturalmente** queste correlazioni (**intrinsecamente quantistiche**) attraverso **modelli quantistici**?

Simulazione di stati complessi

- I computer quantistici possono **simulare direttamente sistemi quantistici** (riproducono l'evoluzione di una Hamiltoniana attraverso l'equazione di Schrodinger)
 - Applicazioni in **fisica** e **chimica** quantistica
- L'entanglement tra i qubit può essere usato rappresentare le correlazioni tra i **partoni** prodotti dalle collisioni in un acceleratore

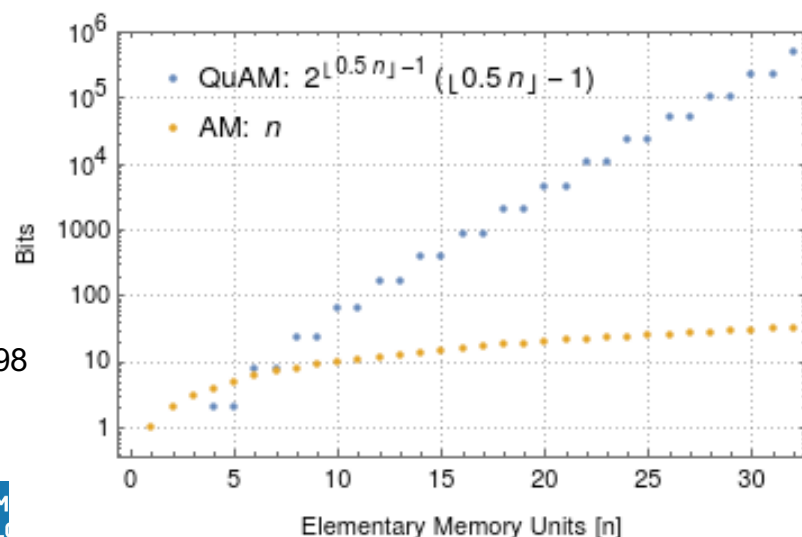
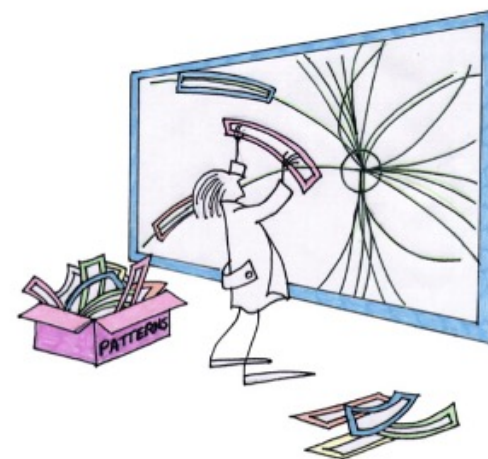


Parton shower simulation
arxiv:1904.03196

Algoritmo di Grover per il tracciamento

Memoria Associativa Quantistica: ricostruire le traiettorie delle particelle creando un database di possibili traiettorie predefinite

L'algoritmo generalizzato di Grover fa il matching con il risultato della misura nel detector



arxiv.org:1902.00498

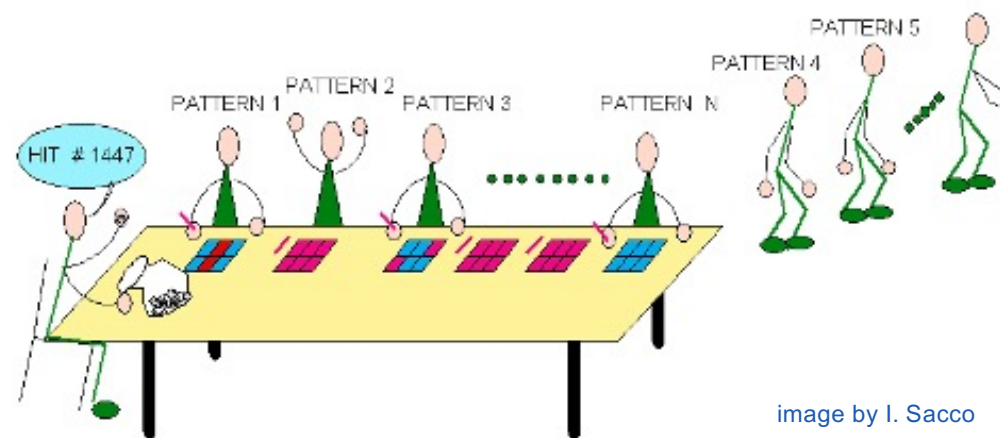
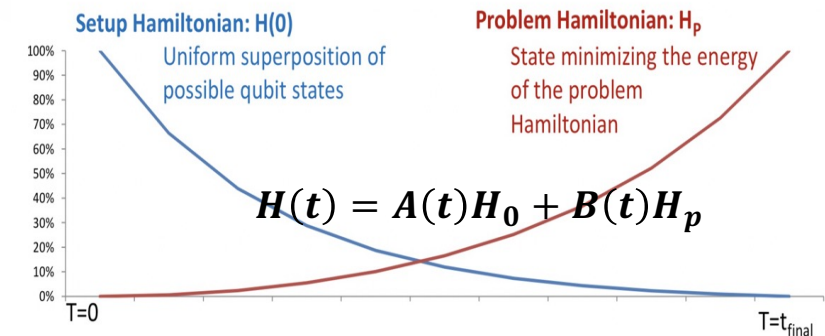


image by I. Sacco

Un approccio alternativo: il Quantum Annealing

- Basato su **qubit superconduttori**
 - **D-Wave 2000Q**: 2048 qubit - 6 connessioni (Chimera)
 - **D-Wave Advantage**: 5436 qubit - 15 connessioni (Pegasus)
- **Problemi di Ottimizzazione**
 - Formulati come un viaggio in un **paesaggio montagnoso**
- **Sfrutta la sovrapposizione** per analizzare simultaneamente diverse configurazioni
- **Quantum tunneling** reduce il rischio di fermarsi su minimi locali
 - “possibilità di attraversare una collina”
- **Entanglement** migliora ulteriormente il risultato:
 - Correlazioni tra le coordinate portano più velocemente alla scoperta di valli più profonde.

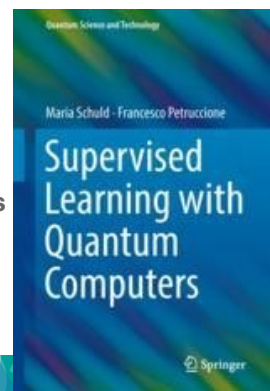


Quantum Machine Learning

QML tutorials e risorse su <https://pennylane.ai>

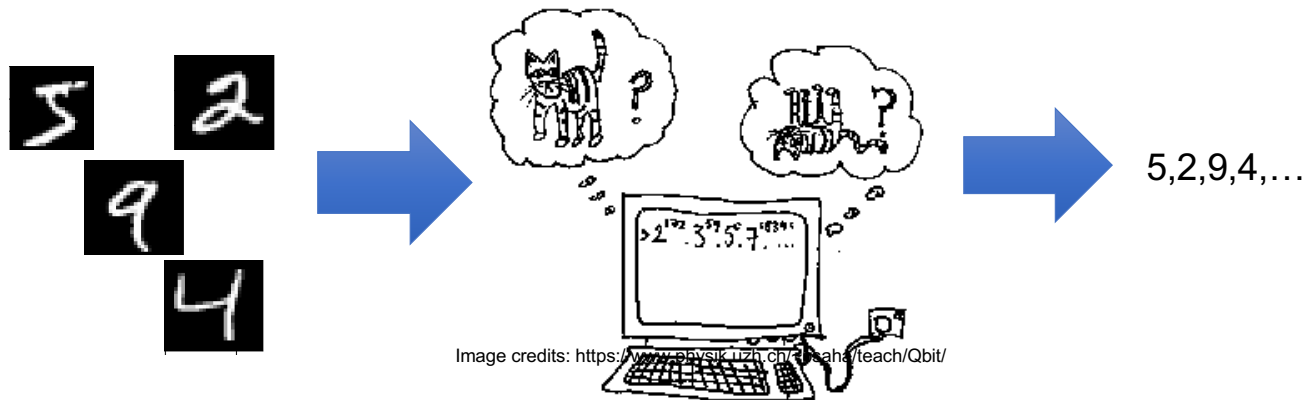
Supervised Learning with Quantum Computers

Maria Schuld
Francesco Petruccione



Quantum Machine Learning

- Quantum Computing può accelerare i processi di apprendimento di modelli di Machine Learning
- Circuiti quantistici sono **differentiabili** e possono apprendere minimizzando una funzione di costo dipendente dal dataset di input



Vantaggio Quantistico per QML?

Definizione:

- Riduzione del tempo di calcolo
- Complessità del dataset
- Capacità di rappresentazione



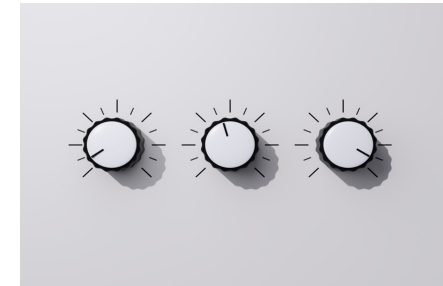
Implementazione pratica vs complessità asintotica:

- Embedding dei dati
- NISQ vs dispositivi ideali
- Applicazioni realistiche



Ambiente sperimentale controllato:

- Uso di un approccio formale alla caratterizzazione degli algoritmi
- Definizione criteri di confronto realistici

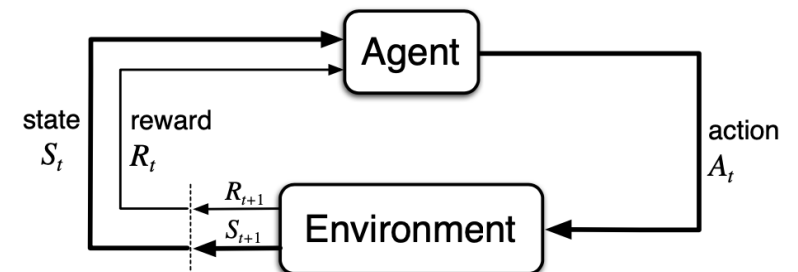


Un cambiamento completo dell'approccio allo studio di algoritmi QML potrebbe portare a risultati utili anche per i modelli classici

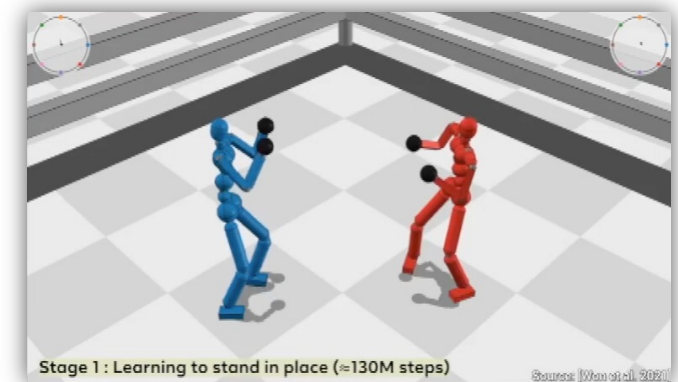
Interessante il lavoro recente di M. Schuld and N. Killoran (arxiv:2203.01340)

Accelerazione dell'apprendimento in Reinforcement Learning

- **Agenti** interagiscono con l'**ambiente esterno**
 - Ricevono una **ricompensa** dopo ogni episodio (ciclo) di apprendimento
 - Imparano attraverso una procedura di **prova-errore**
- L'agente segue una **policy** che gli permette di scegliere l'azione piu' adatta in ogni momento
 - Necessario trovare la **policy ottimale**
 - Usiamo una **implementazione quantistica**



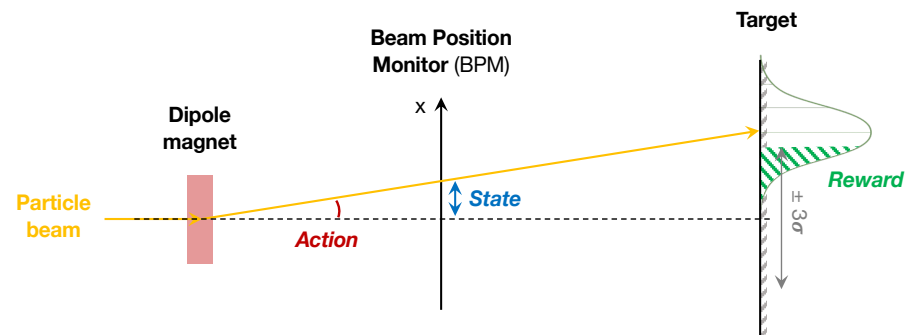
RL book: Sutton & Barto



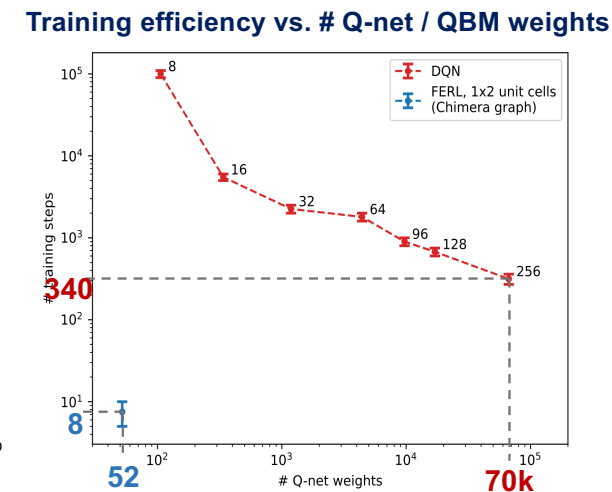
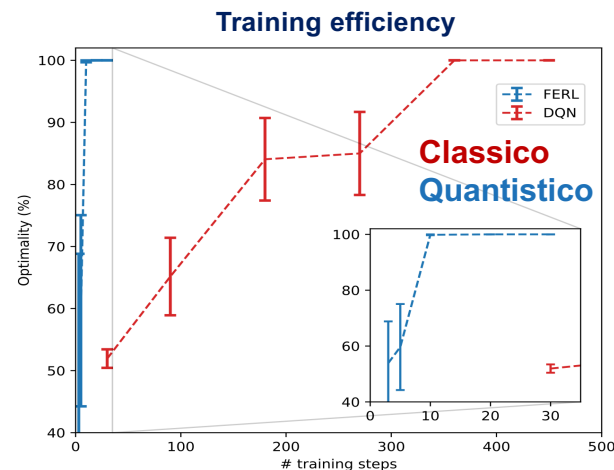
https://www.youtube.com/watch?v=SsJ_AusntiU
<https://www.youtube.com/watch?v=Lu56xVIZ40M>
<https://www.youtube.com/watch?v=imOt8ST4EjAg>
ent

Ottimizzazione di un fascio di particelle in un acceleratore lineare

- **Azione:** angolo di deflessione (*Discreto*)
- **Stato:** posizione del fascio (*Continua*)
- **Ricompensa:** sezione d'urto integrata del fascio rispetto al bersaglio
- **Optimality:** "in quale frazione di tutti gli stati possibili l'agente prende la decisione giusta"



- **Efficienza di training :** implementazione quantistica **supera in modo massiccio** quella classica (8 ± 2 vs. 320 ± 40 step)
- **Capacità descrittiva:** Implementazione quantistica ha **dimensioni molto ridotte** rispetto a quella classica (52 vs. $\sim 70k$ pesi)



Modelli Generativi

Modelli capaci di **generalizzare a partire da dataset di dimensione finite**

- Apprendono la distribuzione di probabilità soggiacente un dataset
- Generano nuovi esempi dalla distribuzione di probabilità appresa

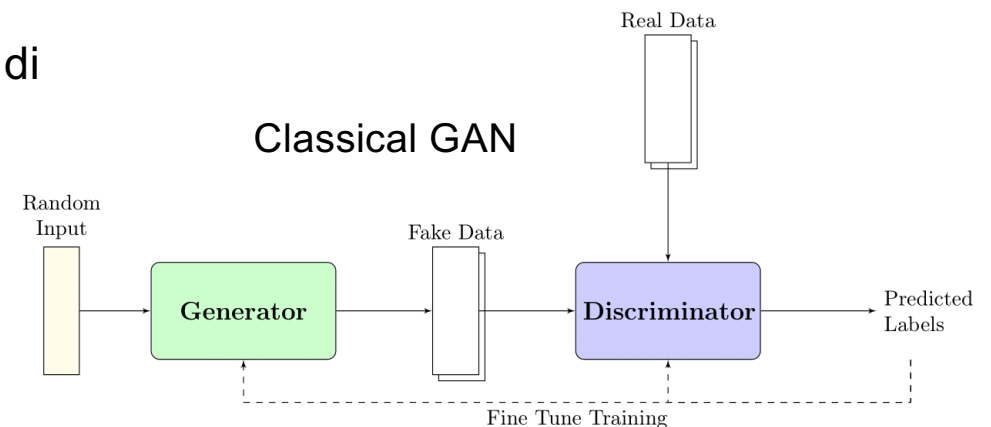
In fisica sono studiati come alternativi al Monte Carlo per la simulazione

Esempi includono **implementazioni quantistiche di**

- **Generative Adversarial Networks (GAN)**
- **Born Machines**
- Boltzman Machines
- Auto-Encoders



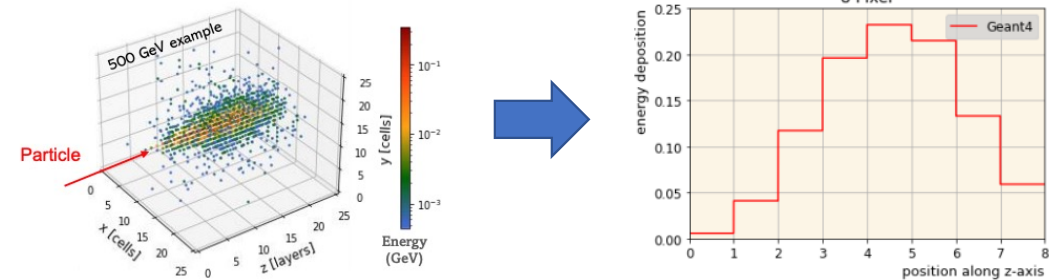
NVIDIA StyleGAN2



Generazione di profili di Energia

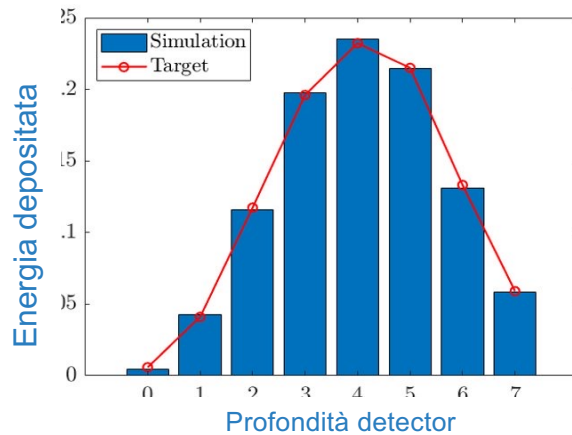
Energia depositata da una particella in un detector

Semplifichiamo il problema riducendo le dimensioni della distribuzione di energia



Un algoritmo ibrido di quantum GAN riesce a generare **immagini realistiche in 1D/2D (simulazione)**

3 qubits



6 qubits

Immagine reale

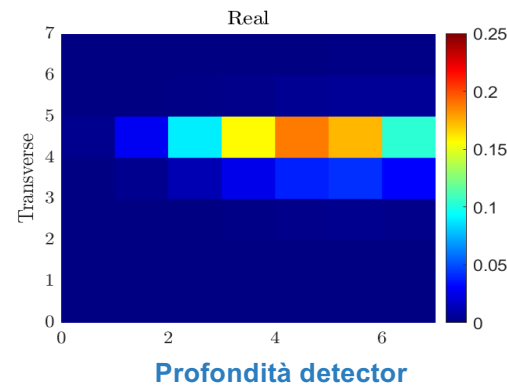
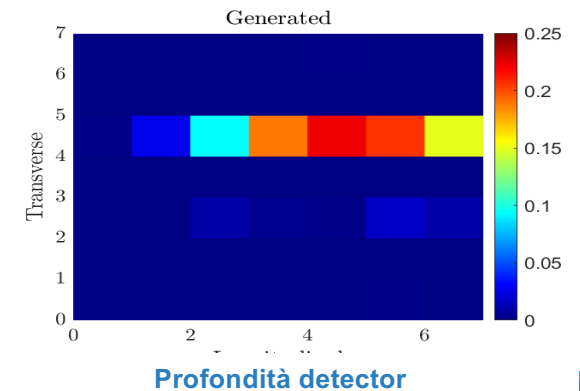


Immagine simulata



Test sull'hardware

Il modello di qGAN è testato su due hardware diversi: superconducting (**IBMQ**) and trapped-ion (**IONQ**)

Device	Readout error CX error	$D_{KL}/D_{KL,ind}$ ($\times 10^{-2}$)
ibmq_jakarta	0.028 $1.367 \cdot 10^{-2}$	0.14 ± 0.14 6.49 ± 0.54
ibmq_lagos	0.01 $5.582 \cdot 10^{-3}$	0.26 ± 0.11 6.92 ± 0.71
ibmq_casablanca	0.026 $4.58 \cdot 10^{-2}$	4.03 ± 1.08 6.58 ± 0.81
IONQ	NULL $1.59 \cdot 10^{-2}$	1.24 ± 0.74 10.1 ± 5.6



Precisione immagine media
Precisione singole immagini

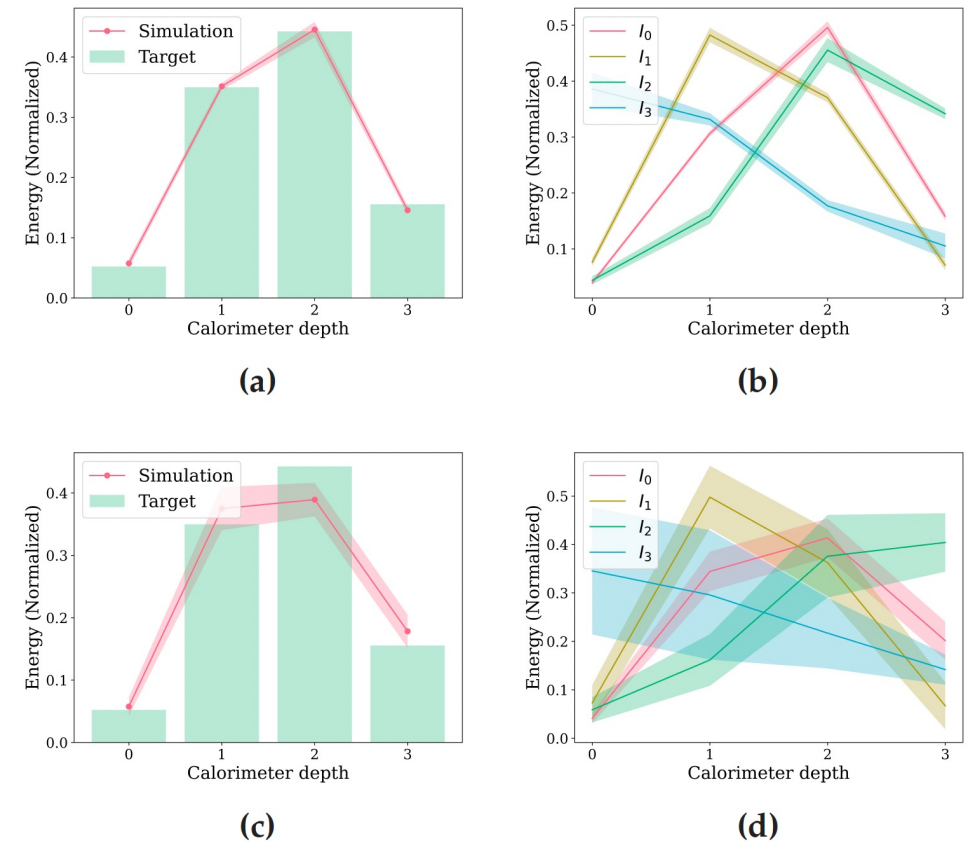
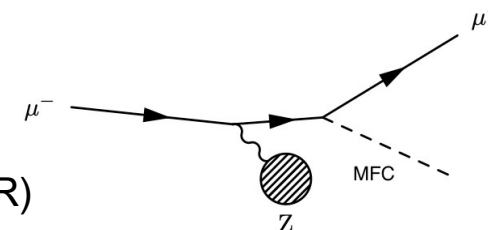


Figure 4: Mean (a,c) and individual images (b,d) obtained by inference test on **ibmq_jakarta** (a,b) and **IONQ** (c,d).

Quantum Circuit Born Machine

Generazioni degli spettri di energia, momento e distribuzioni angolari di muoni e MFC:

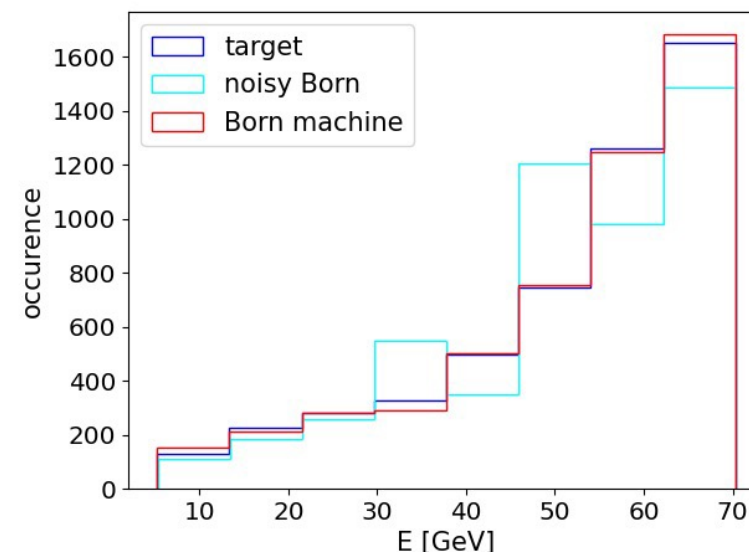
- **MFC (Muon Force Carriers)** previsti da diversi modelli teorici
- **Potrebbero essere osservati in esperimenti di muoni a bersaglio fisso** (es. FASER)
 - o LHC (es. ATLAS).



Born Machine: Metodo generativo intrinsecamente quantistico.

- Lo stato quantistico apprende la **distribuzione di probabilità** a partire dai dati di training
- Il **campionamento viene fatto attraverso il processo di misura** (regola di Born)

$$p_{\theta}(x) = |\langle x | \psi(\theta) \rangle|^2$$



Conclusioni

La QTI coordina la ricerca in tecnologie quantistiche al CERN

Quantum Computing è una area particolarmente attiva

Focus sullo studio di applicazioni **QC and QML a problemi di fisica delle particelle**

- Quasi sono le **difficoltà legate all'implementazione di algoritmi di apprendimento su modelli quantistici o ibridi?**
- Qual'è la performance su dispositivi di tipo **NISQ**?
- Esiste un vantaggio quantistico? Di che tipo?

CERN Quantum Technology Initiative

Accelerating Quantum Technology Research and Applications

Grazie!

Sofia.Vallecora@cern.ch

Esempi di materiale divulgazione

- <https://www.explainthatstuff.com/howtransistorswork.html>
- How computers work: circuits and logic: <https://www.youtube.com/watch?v=ZoqMiFKspAA>
- https://electronicsreference.com/moores_law/
- <https://aca.edu.au/resources/logic-gates/>
- <https://progresser-en-maths.com/loi-de-moore/>
- Comment fabriquer CPUs: <https://www.techspot.com/article/1830-how-cpus-are-designed-and-built-part-2/>
- Quantum computing explained: <https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/quantum-computing-kids-understand/>
- Comment ça marche un ordinateur quantique:
<https://www.youtube.com/watch?v=rNdWOXQ8V4A>
- Computation quantique en carton:
<http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/ordiquantiquecarton/>
- Minute Physics
 - Wave/Particle Duality: https://www.youtube.com/watch?v=Q_h4loPJXZw and https://www.youtube.com/watch?v=_rilY-v2Ym8
 - Quantum tunnelling: <https://www.youtube.com/watch?v=cTodS8hkSDg>
- http://acartoonguidetophysics.blogspot.com/2012/12/quantum-story-telling-schrodingers-cat_14.html
- Science unplugged: Quantum Mechanics: https://www.youtube.com/playlist?list=PL0ocSlkChBREqGWRm2J1yLqKP_GPET0f2
- Quantum Physics: <https://www.real-world-physics-problems.com/quantum-physics-for-kids.html>
- Quantum annealing: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_2.html
- Quantum games: <https://quantum-hub.herokuapp.com/app/tsp>
- Quantum kit: <http://quantum-bc.ca/learn/diversifying-talent-in-quantum-computing/quantum-kit/>
- Calculer differemment: <https://interstices.info/calculer-differemment/>
- RSA et Shor: <https://interstices.info/nombres-premiers-et-cryptologie-lalgorithme-rsa/>
- Grover's Algorithm: <https://medium.com/quantum-untangled/grover-s-algorithm-mathematics-circuits-and-code-quantum-algorithms-untangled-c4aa47d506e5>
- Introduction to Quantum computing: <https://qiskit.org/textbook-beta/course/introduction-course>
- Symmetry Magazine articles on Quantum research: <https://www.symmetrymagazine.org/article/playing-by-the-quantum-rules>
- Tout comprendre à l'informatique quantique: <https://www.zdnet.fr/pratique/tout-comprendre-a-l-informatique-quantique-39891035.htm>