

SQMS

Superconducting Quantum Materials and Systems QUICHE

Quantum information and communication with high-dimensional encoding



Lorenzo Maccone

Chiara Macchiavello

Dipartimento di Fisica,
INFN Sez. Pavia,
Universita' di Pavia

QUnit
quantum information
theory group
www.qubit.it



INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

maccone@unipv.it

Visto che il nostro mondo e'
quantistico, perche' limitare la nostra
tecnologia al sottoinsieme classico?!



Visto che il nostro mondo e' quantistico, perche' limitare la nostra tecnologia al sottoinsieme classico?!

Tecnologie quantistiche

- Trasmissione di info
- Misurazioni ultraprecise
- Crittografia
- Computazione avanzata
- Aumento nell'efficienza di motori, celle fotovoltaiche, etc.
- Aumento della velocita' dei computer
- etc....



Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono già
risolti efficientemente con MC

Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono già
risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!



Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono già risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!

Uno degli scopi principali oggi delle quantum technologies:



Cosa si guadagna a usare MQ?

Per alcuni problemi: niente

viviamo nel mondo classico, alcuni problemi sono già risolti efficientemente con MC

Altri problemi: MOLTO!

Uno degli scopi principali oggi delle quantum technologies:

scoprire nuovi ambiti dove MQ aiuta!

Di cosa stiamo parlando?!?

Esempi di tecnologie quantistiche

- Quantum computer
computazioni rapidissime
- Metrologia quantistica
misure alla precisione ultima
- telecomunicazioni
trasmissione di informazione



Progetto SQMS

Optimize the coherence time of superconducting qubits



Optimize the coherence time of
superconducting qubits

Build a superconducting quantum
computer using the Fermilab
cavities



Optimize the coherence time of
superconducting qubits

Build a superconducting quantum
computer using the Fermilab
cavities



Fundamental physics (especially
Fermilab themes: dark matter, dark
photons, etc.)

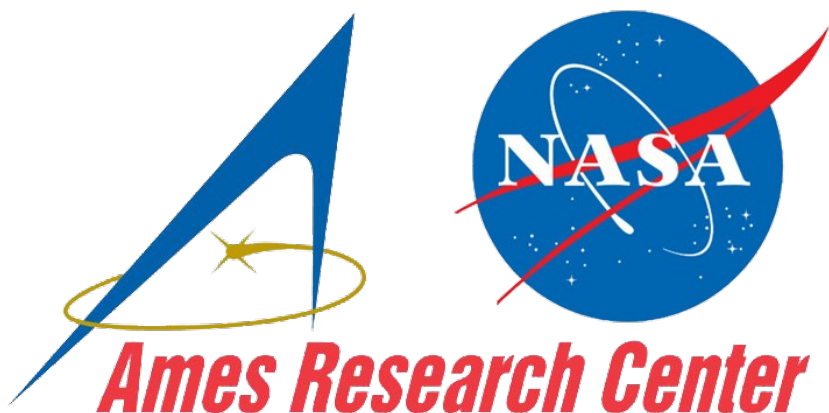
Chi e' coinvolto?

 **Fermilab**
rigetti

ILLINOIS INSTITUTE
OF TECHNOLOGY 



**Northwestern
University**



Unitary Fund



Etc.

Chi e' coinvolto?

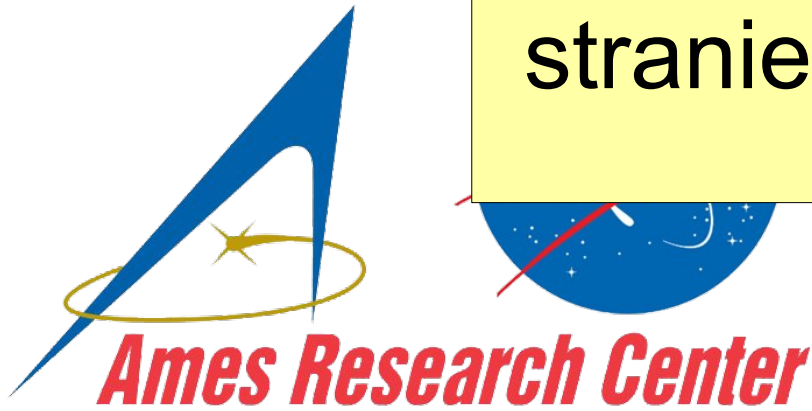
ILLINOIS INSTITUTE
OF TECHNOLOGY



 **Fermilab**

rig

INFN e' l'unico partner
straniero di tutta l'iniziativa



 **AMES LABORATORY**
Creating Materials & Energy Solutions
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

NIST
National Institute of
Standards and Technology
U.S. Department of Commerce


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

**Goldman
Sachs**

I UNIVERSITY OF
ILLINOIS
URBANA-CHAMPAIGN

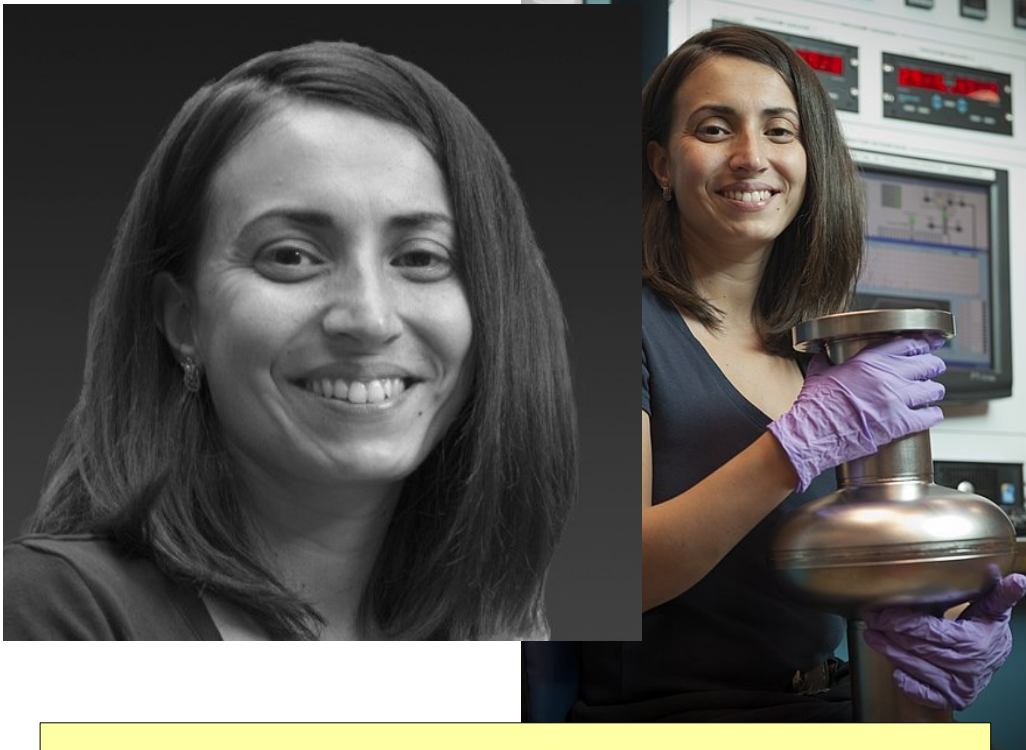

LOCKHEED MARTIN

Unitary Fund


Stanford
University

Etc.

Il direttore

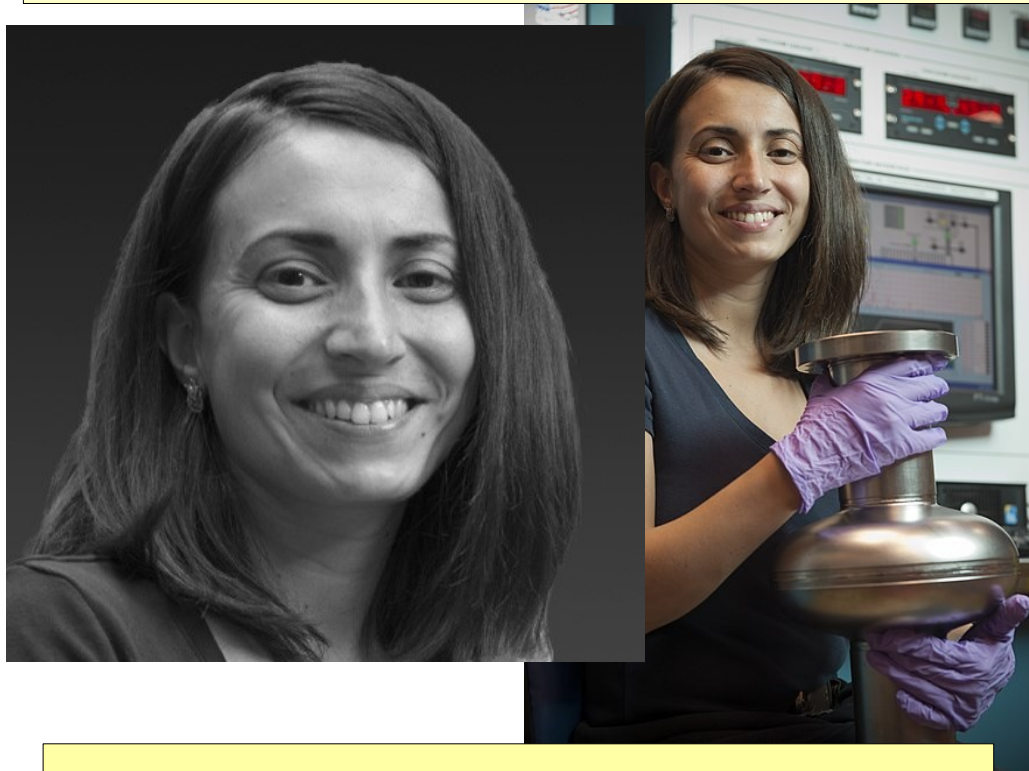


Anna Grassellino
(Fermilab)

D La Repubblica ha da poco nominato [Donna dell'Anno 2020](#)



Il direttore



Anna Grassellino
(Fermilab)

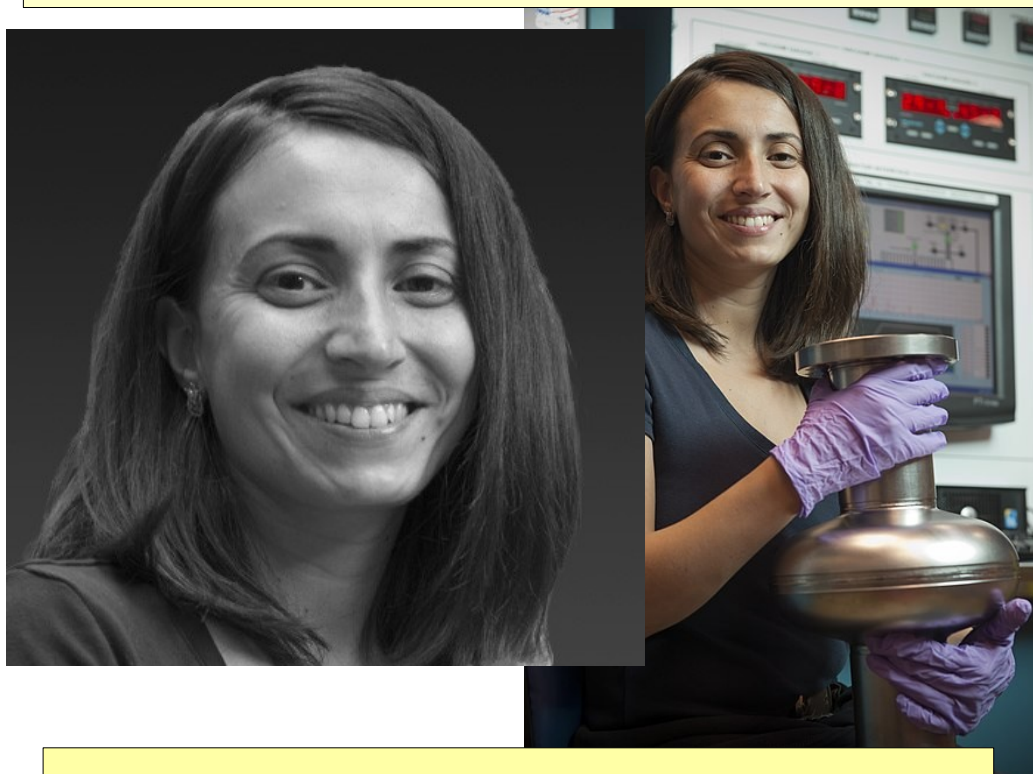
D La Repubblica ha da poco nominato [Donna dell'Anno 2020](#)



INFN Italia:
Lele Tripiccionone



Il direttore



**Anna Grassellino
(Fermilab)**

D La Repubblica ha da poco nominato [Donna dell'Anno 2020](#)



**INFN Italia:
Lele Tripiccione**



**INFN Pavia:
Lorenzo Maccone
Chiara Macchiavello**

Durata: 5 anni!



Marzo 2020: riunione per preparare il progetto

Fine 2020: Inizio progetto
Marzo 2021: soldi in Italia
Giugno 2021: primi assegni?

Soldi: Department of Energy (DoE)

USA

~120M \$

All'INFN: ~1.5M DoE+300K INFN

All'INFN Pavia: 2 Post-doctoral positions, consumables funds, trips funds (hosted in Ferrara)



Struttura del progetto

Quantum Technology Thrust

Quantum Science Thrust

QIS Ecosystem
(workforce development)



Struttura del progetto

Quantum Technology Thrust

Quantum Science Thrust

QIS Ecosystem
(workforce development)

NOI

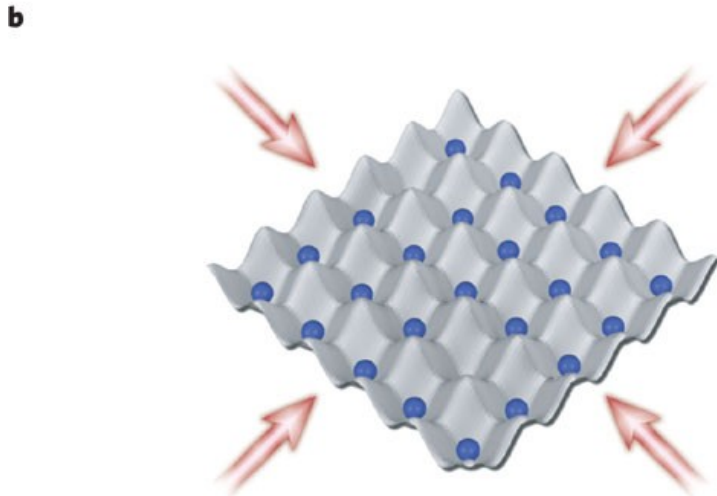
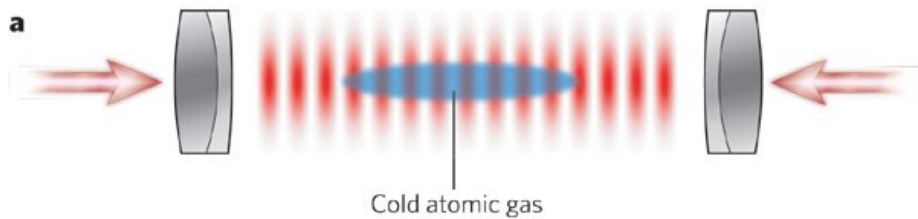


GGI

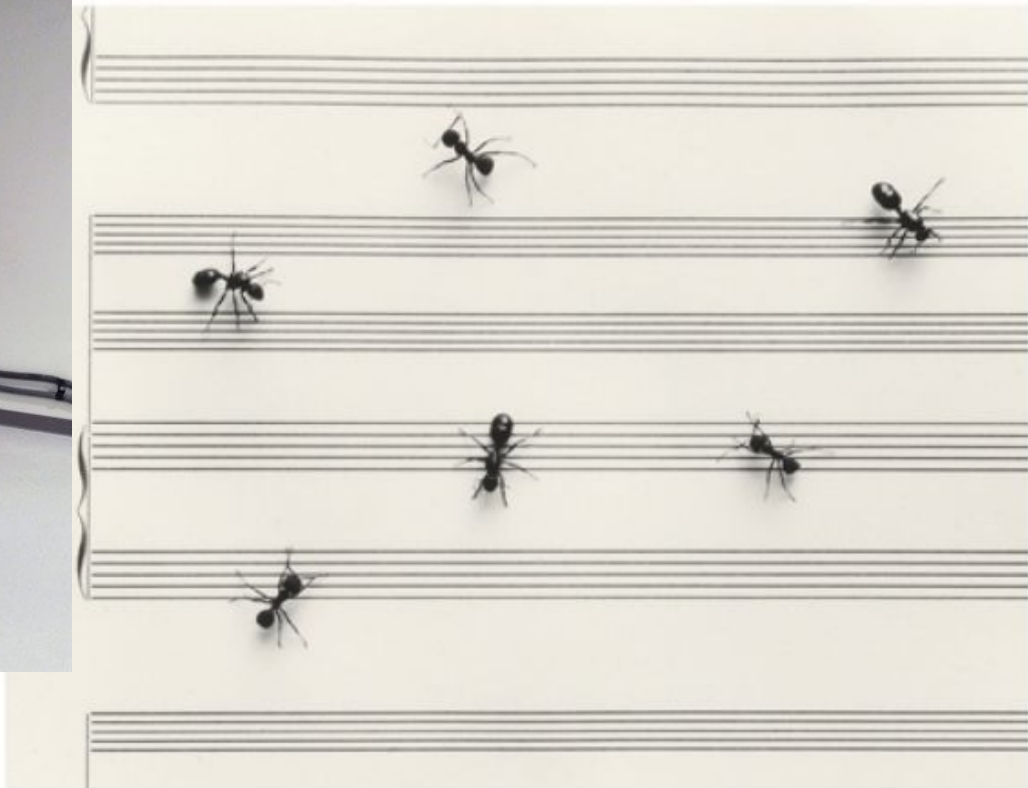
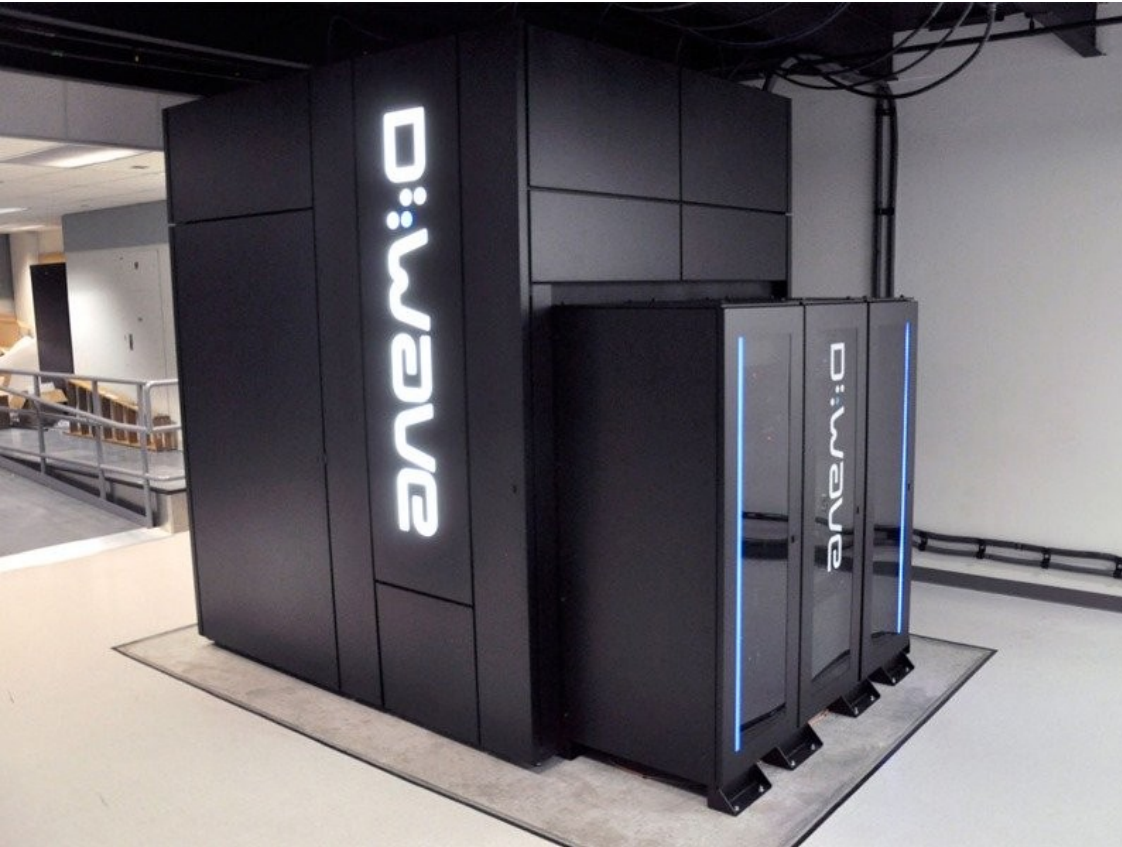
esistono quantum computer?

Non ancora!

Molti gruppi stanno cercando di creare un quantum computer: non e' ancora chiaro quale sia la tecnologia piu' promettente forse optical lattice?



Oggi esistono molti prototipi: Dwave, rigetti, google, ibm, amazon braket.



Quantum Computers in SQMS

Quantum Computers in SQMS

Usare le cavita' SRF del Fermilab per aumentare il numero di qubits e la loro vita media (quindi il numero di operazioni)

Processor Metrics	Leading Systems	Center Prototypes (3 yr)		Center Device Goals (5 yr)	
		2D-Alpha (estimate)	SRF-Alpha (estimate)	SQMS-2D (estimate)	SQMS-3D (estimate)
Number of qubits	53	128	>100	256	>200
Connectivity graph (qubit:neighbors)	1:4	1:3	1:10	1:3	1:200
Qubit T_1 lifetime, us (median)	70	200	400,000	400	1,000,000
Gate time, ns (median)	20	50	2000	40	100
Coherence/gate time ratio	1,000	4,000	20,000	10,000	100,000,000
Single qubit gate fidelity (%)	99.85	99.6	99.5	99.95	99.95
Two qubit gate fidelity (%)	99.65	99.2	99.5	99.9%	99.95
Achievable circuit depth (1/error)	300	100	200	1,000	2,000

Quantum Computers in SQMS

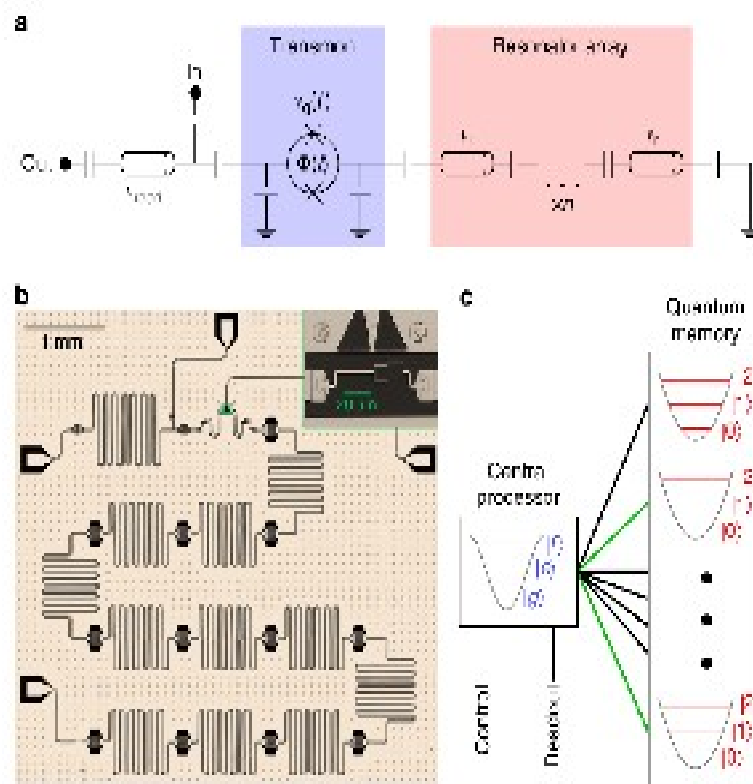
Usare le cavita' SRF del Fermilab per aumentare il numero di qubits e la loro vita media (quindi il numero di operazioni)

Goal ambizioso (forse troppo?)

Processor Metrics	Leading Systems	Center Prototypes (3 yr)		Center Device Goals (5 yr)	
		2D-Alpha (estimate)	SRF-Alpha (estimate)	SQMS-2D (estimate)	SQMS-3D (estimate)
Number of qubits	53	128	>100	256	>200
Connectivity graph (qubit:neighbors)	1:4	1:3	1:10	1:3	1:200
Qubit T_1 lifetime, us (median)	70	200	400,000	400	1,000,000
Gate time, ns (median)	20	50	2000	40	100
Coherence/gate time ratio	1,000	4,000	20,000	10,000	100,000,000
Single qubit gate fidelity (%)	99.85	99.6	99.5	99.95	99.95
Two qubit gate fidelity (%)	99.65	99.2	99.5	99.9%	99.95
Achievable circuit depth (1/error)	300	100	200	1,000	2,000

Quantum Computers in SQMS

- start from this “general purpose” QC-architecture:



- each (poorly engineered) “resonator” is a two-state qbit; this is an 11 qbit Q-computer

Quantum Computers in SQMS

- replace solid-state waveguides by superior quality SRF resonators



Fermilab SRF resonators

$$Q > 10^{10}$$

$$T_{\text{coherence}} > 1 \text{ s}$$

- hope to control up to $2^{14} \simeq 16000$ energy levels in each cavity;
couple together 9(+9) cavities;
equivalent system of $9 \times 14 \geq 120$ qbit (the qdit approach).

My (current) research in SQMS

My (current) research in SQMS

Usare quantum computer per fare test di fondamenti della meccanica quantistica.

My (current) research in SQMS

Usare quantum computer per fare test di fondamenti della meccanica quantistica.

Test di Peres: perche' si usa un campo complesso per descrivere i vettori di stato?

Test di Sorkin: perche' la probabilita' quantistica e' il *quadrato* del modulo del prodotto scalare?

My (current) research in SQMS

Usare quantum computer per fare test di fondamenti della meccanica quantistica.

Test di Peres: perche' si usa un campo complesso per descrivere i vettori di stato?

Test di Sorkin: perche' la probabilita' quantistica e' il *quadrato* del modulo del prodotto scalare?

Sono due **POSTULATI**, quindi soggetti a verifica sperimentale.

My (current) research in SQMS

Tecniche di inversione del rumore in tomografia quantistica di qubits. (Collaborazione con Marco Pains, Rigetti)

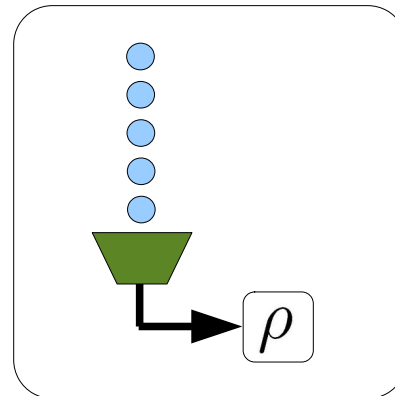


My (current) research in SQMS

Tecniche di inversione del rumore in tomografia quantistica di qubits. (Collaborazione con Marco Pains, Rigetti)

No-cloning + uncertainty principle \Rightarrow impossible to recover the state from a single system

Quantum tomography: a method to recover the **state of a system** and the expectation value of arbitrary operators (even not observables) by **repeated measurements** of a complete set of observables on an ensemble of identically prepared systems.



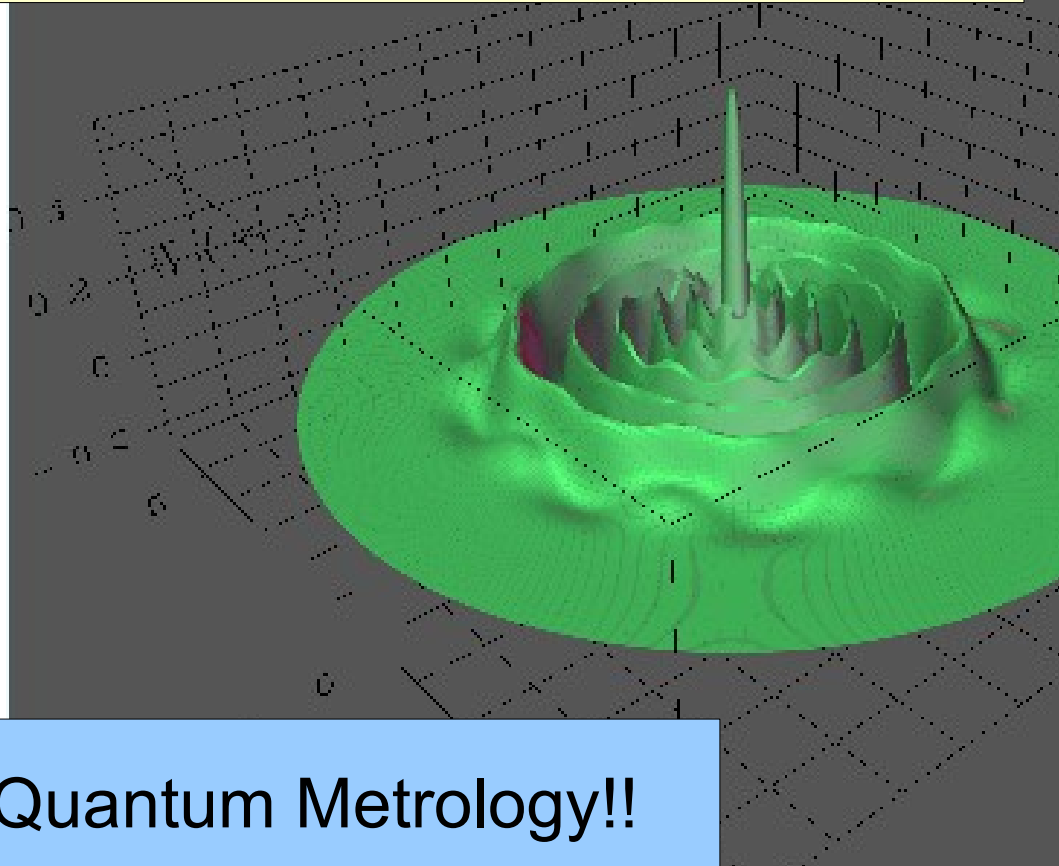
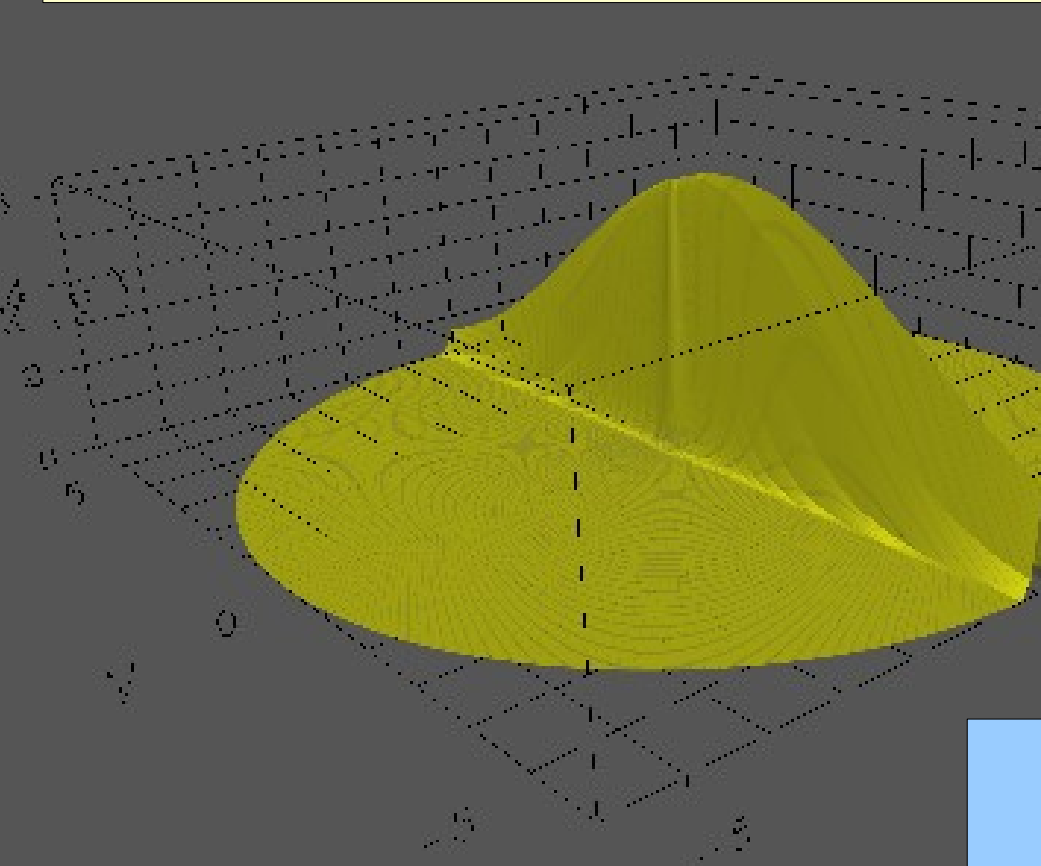
My (current) research in SQMS

Ottimizzazione delle misure di campo elettromagnetico in cavita' per la ricerca dell'assione (collaborazione con Caterina Braggio, INFN Padova).

Quantum Metrology!!

My (current) research in SQMS

Ottimizzazione delle misure di campo elettromagnetico in cavita' per la ricerca dell'assione (collaborazione con Caterina Braggio, INFN Padova).



Quantum Metrology!!

Quantum Metrology

Cos'e' una misurazione? 3 stadi

1. Preparazione dell'apparato di misura



Cos'e' una misurazione? 3 stadi

1. Preparazione dell'apparato di misura



2. Interazione con l'oggetto da misurare



Cos'e' una misurazione? 3 stadi

1. Preparazione dell'apparato di misura



2. Interazione con l'oggetto da misurare



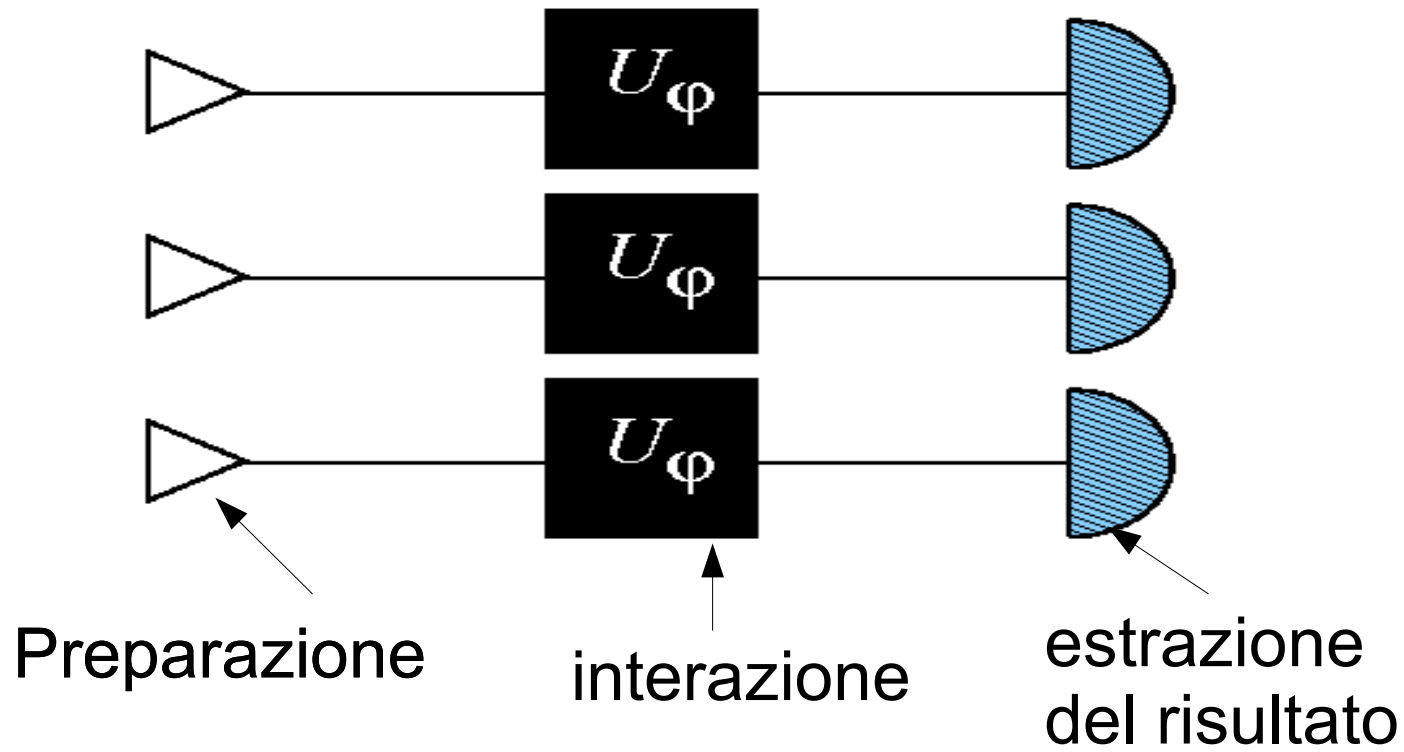
3. Estrazione del risultato



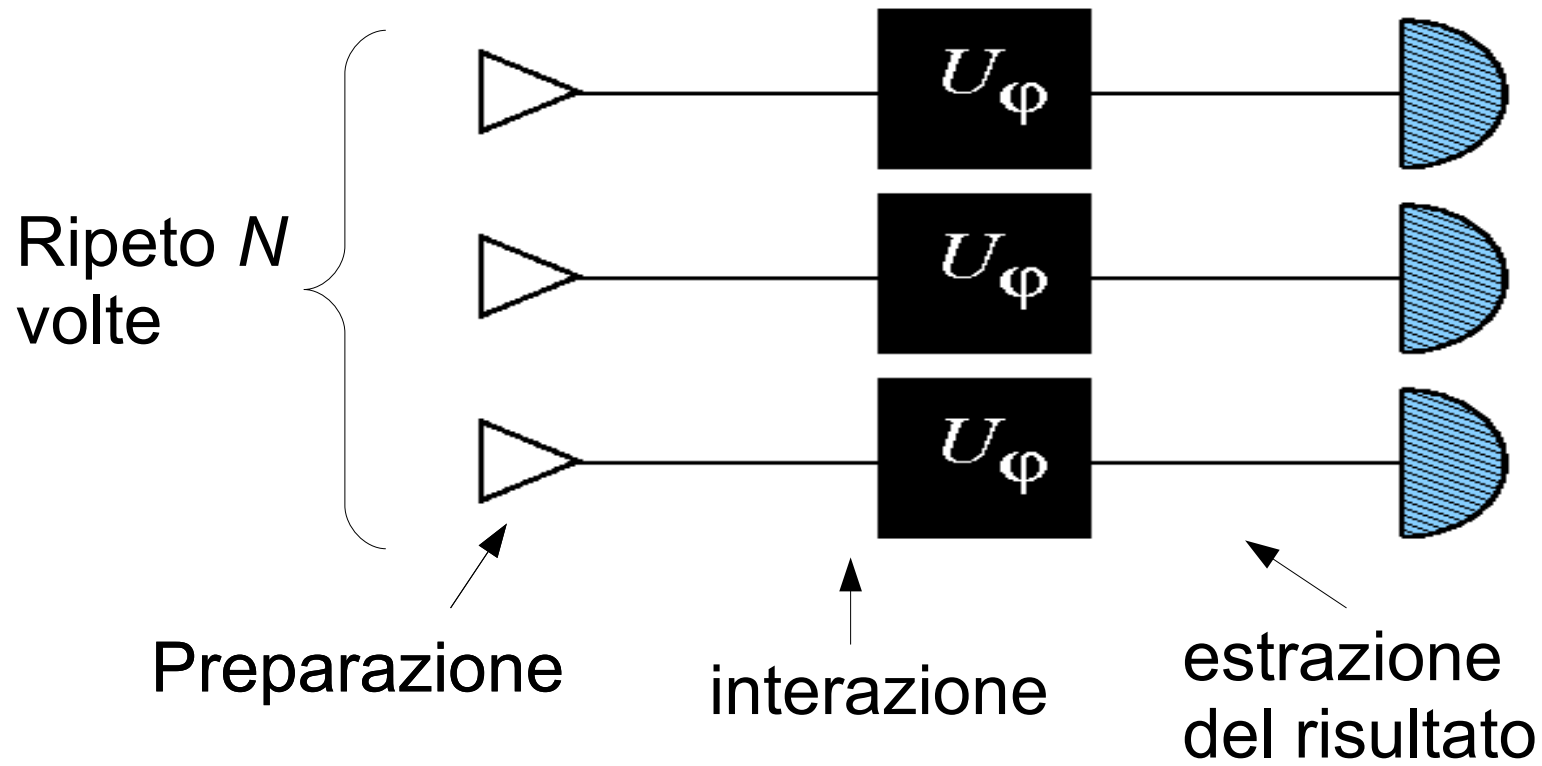
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



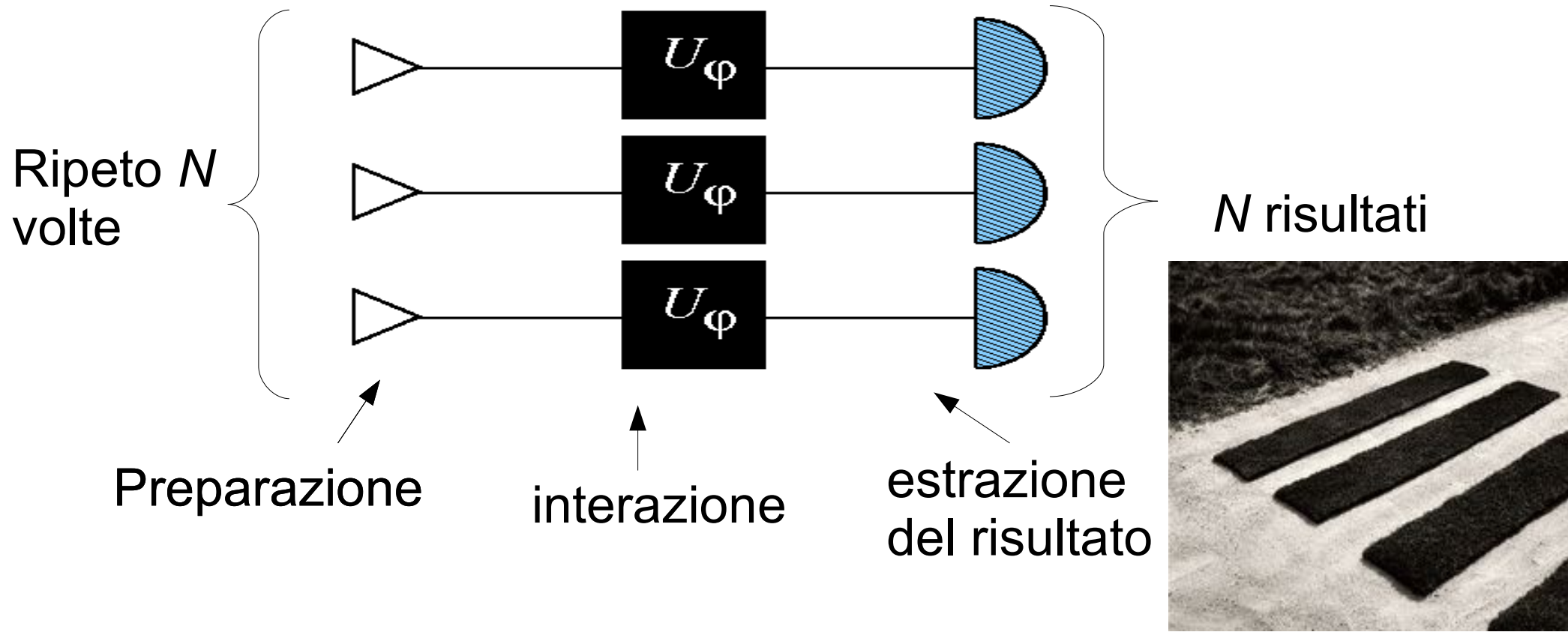
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



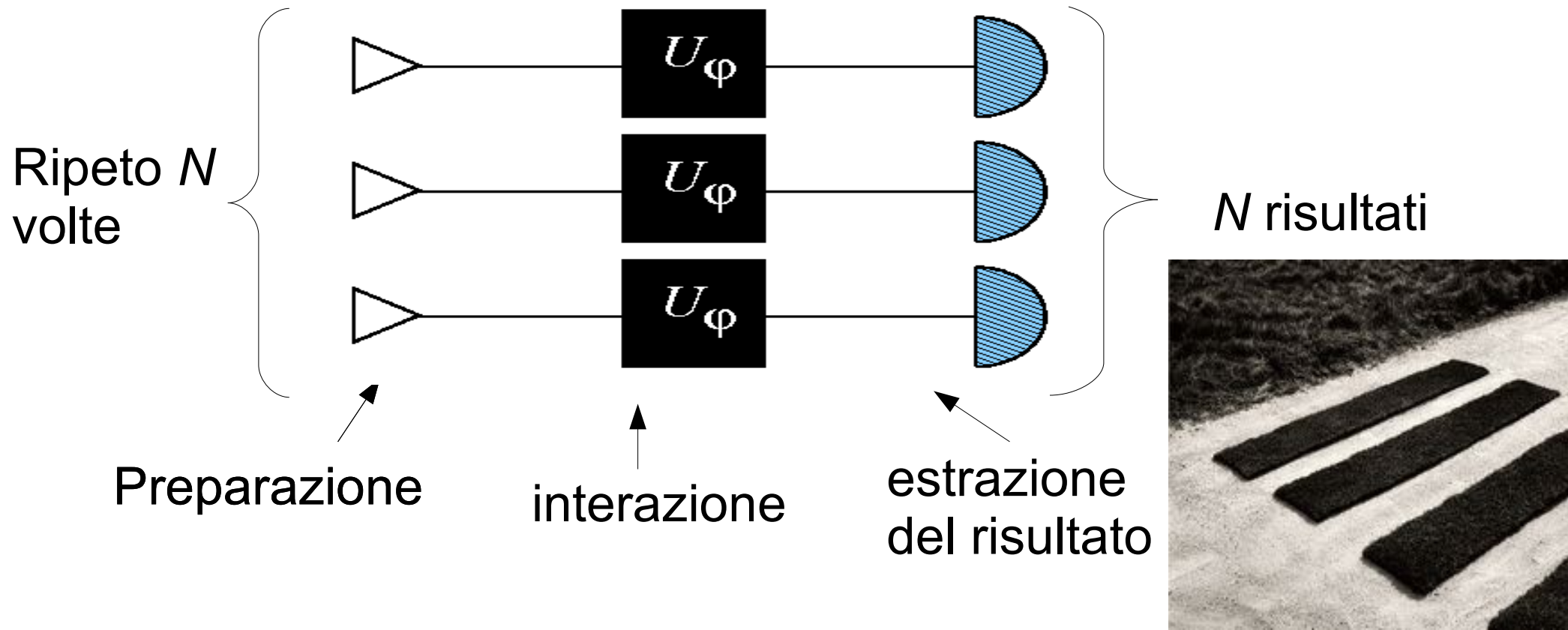
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)

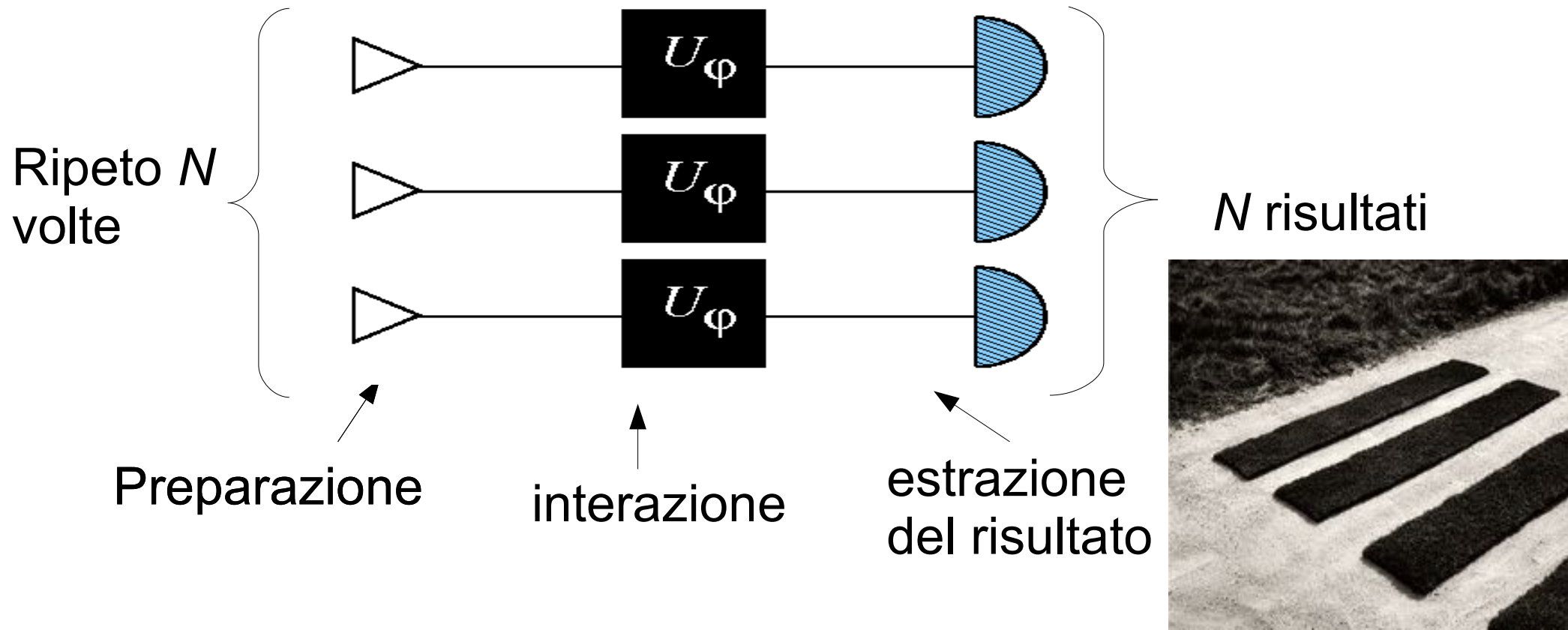


(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

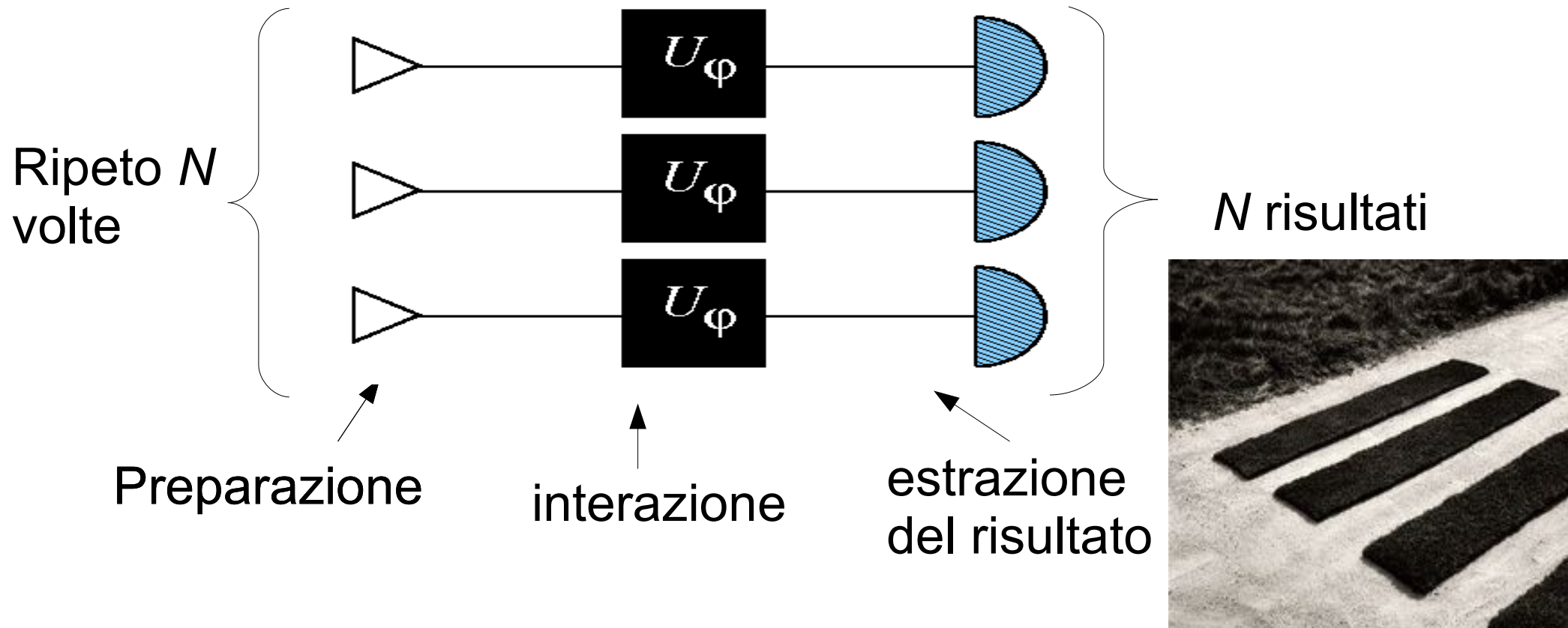
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore?

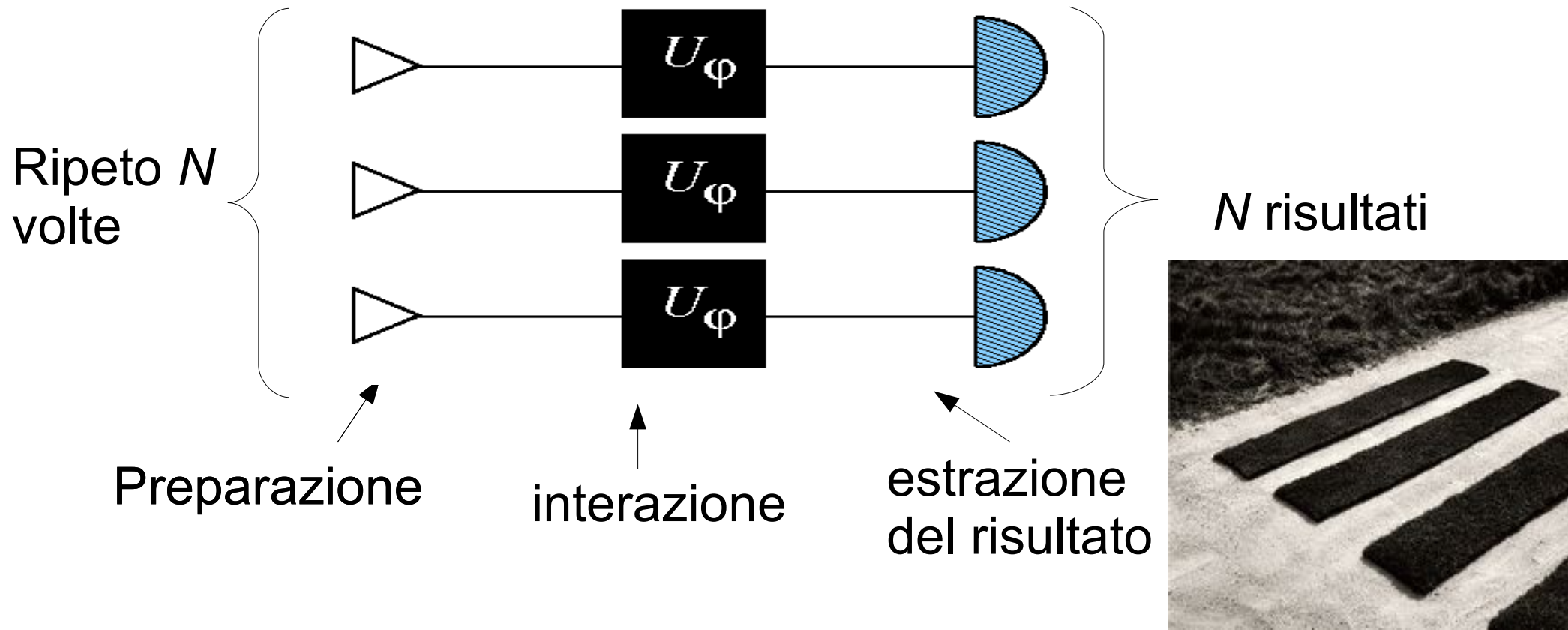
(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore? $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$

(4. Ripetere piu' volte per ridurre gli errori statistici)



Risultato finale: media dei risultati.

Errore? $\Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (teorema del limite centrale)

Errore $\rightarrow \Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?



Errore $\rightarrow \Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

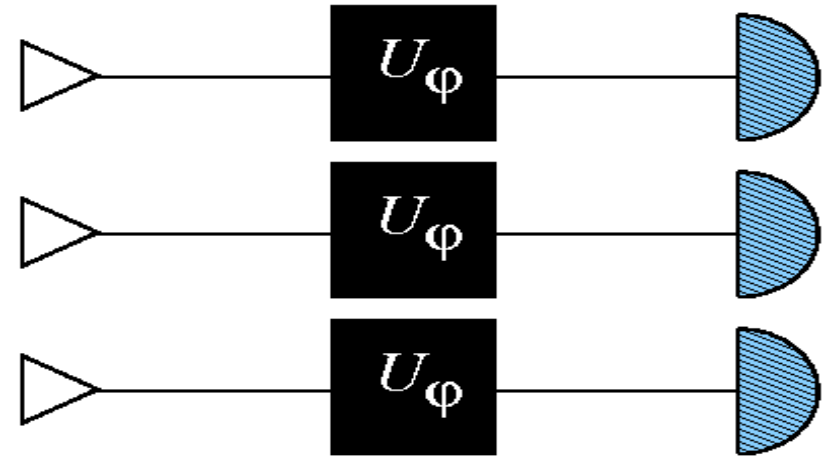


Errore $\rightarrow \Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso **entanglement**
tra gli apparati di
misura

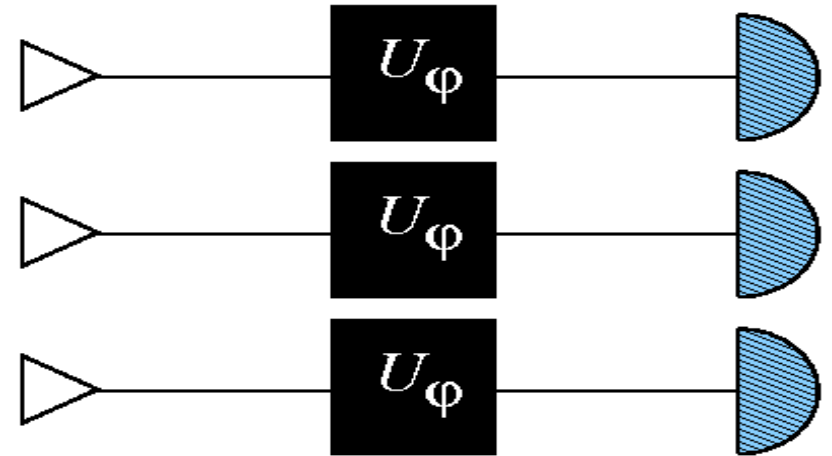


Errore $\rightarrow \Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso **entanglement**
tra gli apparati di
misura



posso **ridurre** l'errore
a

$$\Delta\varphi \propto \frac{1}{N}$$

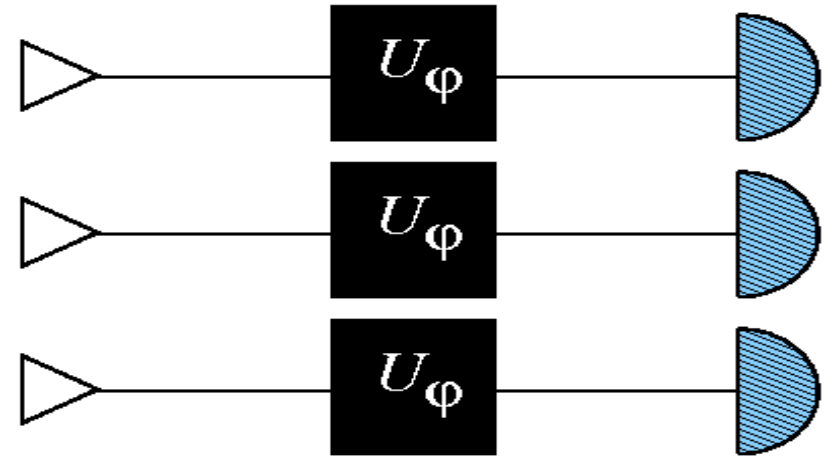


Errore $\rightarrow \Delta\varphi \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$ (standard quantum limit)

posso fare meglio?

SI'!!

se uso **entanglement**
tra gli apparati di
misura



posso **ridurre** l'errore

a $\Delta\varphi \propto \frac{1}{N}$ (Heisenberg bound)

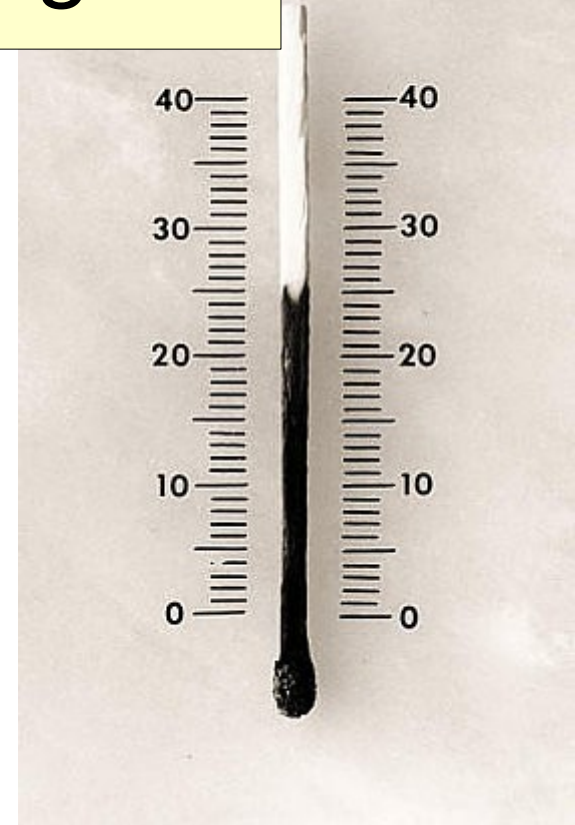


Tecniche applicabili a qualunque tipo di misura!!

- Misura di posizione e tempo (quantum gps)
- Misure interferometriche (onde gravitaz, etc.)
- Orologi atomici
- etc.

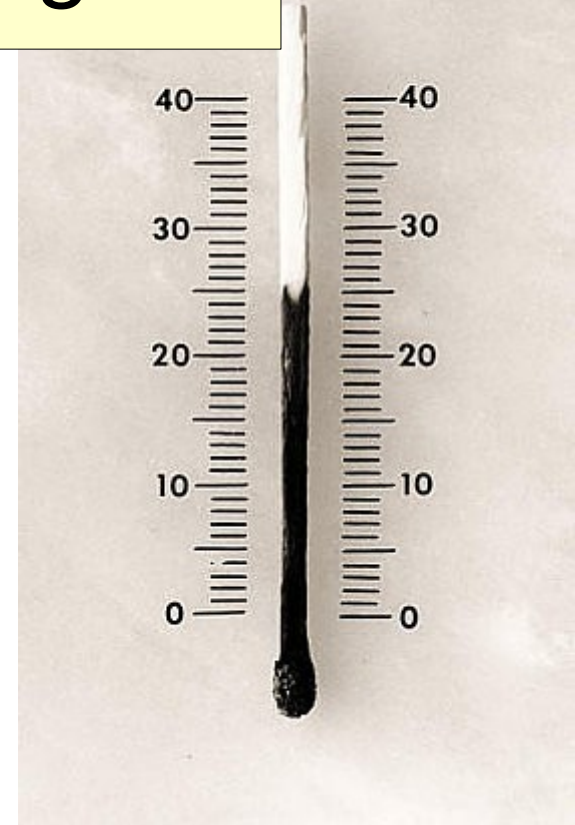


q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?



q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

NO!



q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

NO!

analizzare la fisica dal punto di vista
dell'elaborazione di informazione:

rivoluzione anche a livello concettuale



q. tech: solo una rivoluzione tecnologica?

NO!

analizzare la fisica dal punto di vista dell'elaborazione di informazione:

rivoluzione anche a livello concettuale



esempio: gravita' quantistica!

Le ultime idee sulla fisica quantistica dei buchi neri vengono dal pensare quali tipi di operazioni uno potrebbe fare con un buco nero.

Take home message

Lorenzo Maccone
maccone@unipv.it

[Figure: Chema Madoz]

**Quantum technology:
il futuro della tecnologia..
ma non solo!**





Quantum information and communication with high-dimensional encoding: the QuICHE project

Chiara Macchiavello
University of Pavia



The QuICHE consortium

INFN-Sezione di Pavia (IT):
C. Macchiavello (Coordinator)

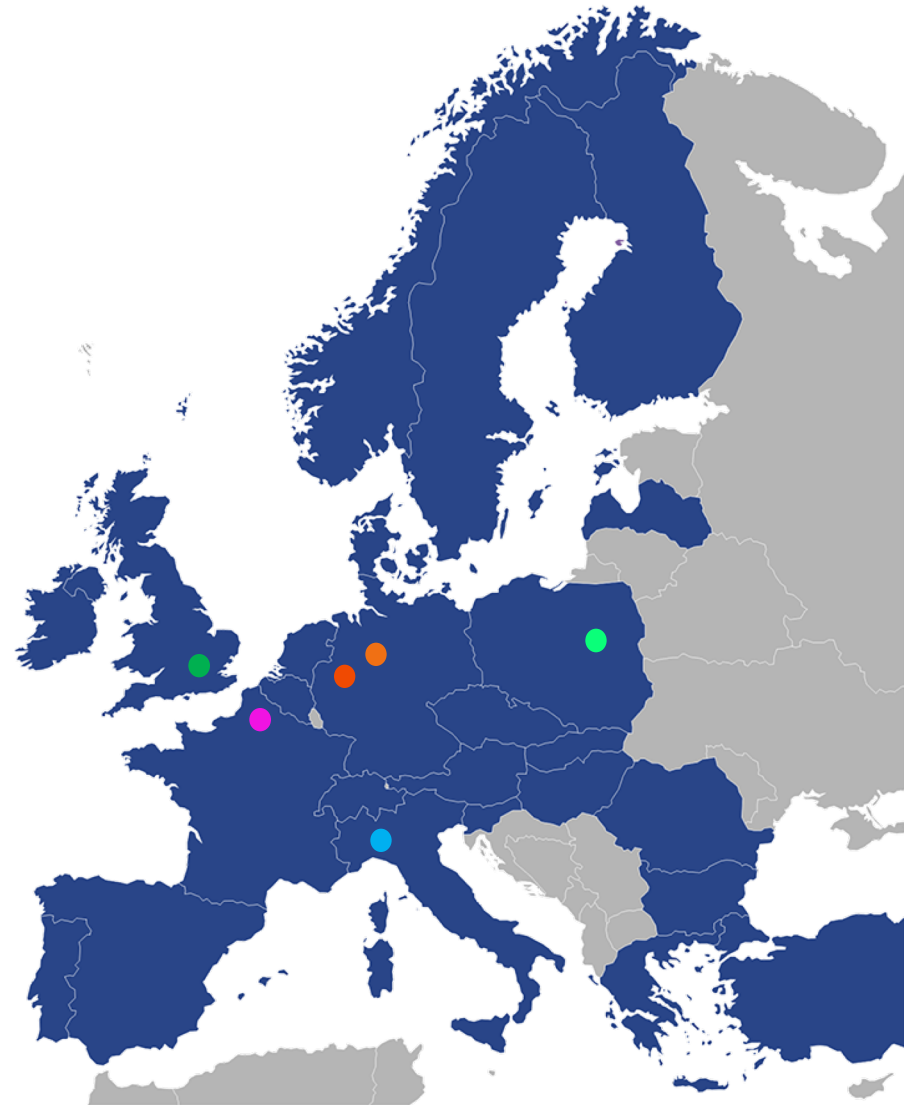
Dusseldorf University (DE):
D. Bruss

Paderborn University (DE):
C. Silberhorn

Imperial College-London (UK):
I. Walmsley

CNRS-Lille (FR):
M. Kholobov

Warsaw University (PL):
M. Karpinski



Beyond qubits

Encode information into quantum systems of finite dimension $d > 2$



Advantages in **quantum communication**, for increased quantum communication rates and secret key rates in quantum key distribution, and higher noise resilience in transmission and entanglement distribution

AIM: explore further advantages from theoretical and experimental side, with implementation in quantum optical systems where information is encoded in the spectral-temporal degrees of freedom of light

This encoding allows for multiplexing of quantum information in a single spatial mode (**scalability advantage**), suited for guided-wave communications and integrated devices.

Main objectives

1) High-dimensional encoding and multiplexing schemes in time & frequency for quantum protocols **with single systems**

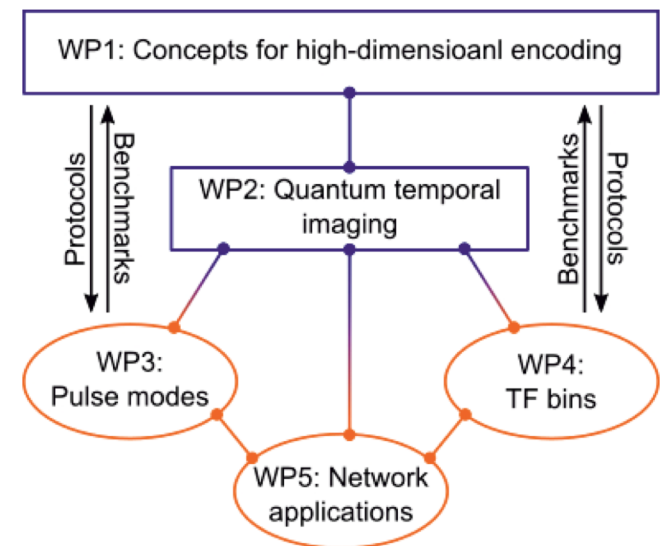
(channel capacities, QKD, dimension witnesses)

2) High-dimensional schemes for quantum protocols **with composite systems**, i.e. employing entanglement

(superdense coding, Bell inequality violation, entanglement-based QKD, entanglement witnesses, and verification of conditional non-classicality)

3) Interfaces between ST encodings (pulse modes and TF bins) using quantum temporal imaging and quantum memories

(hybrid-encoding networks, low-loss conversion between different mode bases, conversion of time scales)



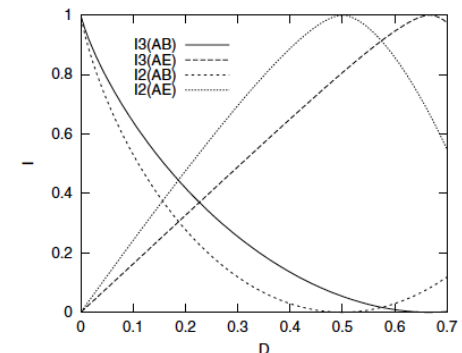
Concepts for HD encoding

Develop **efficient methods in HD encoding** for:

- entanglement detection
- Bell-inequality violation
- detection of steering properties
- randomness expansion
- detection of channel properties and capacities
- dimension witnesses

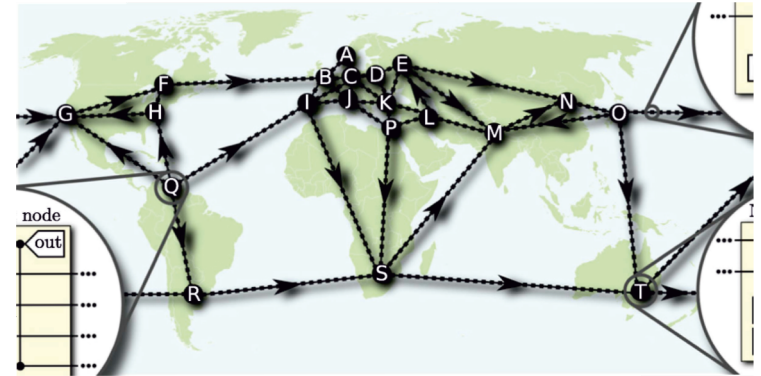


Explicit **security analysis** of HD quantum cryptographic systems in bipartite case (with practical limitations)

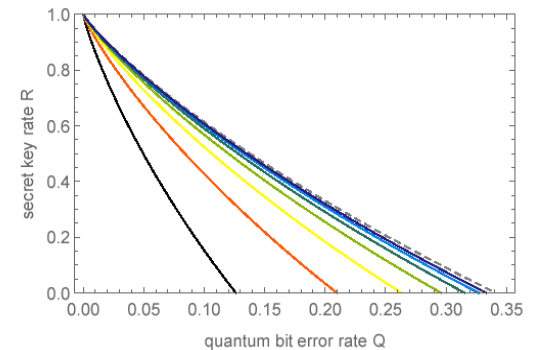
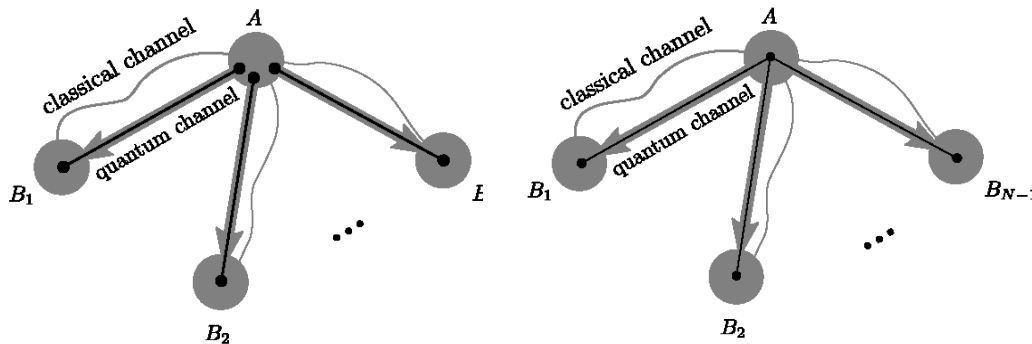


Quantum networks

Analysis of **quantum networks** for HD encoded states with a focus on efficient network coding strategies and **multipartite HD-QKD**



Exploration of **advantages** in multipartite entanglement and with increasing **dimension** for multipartite QKD



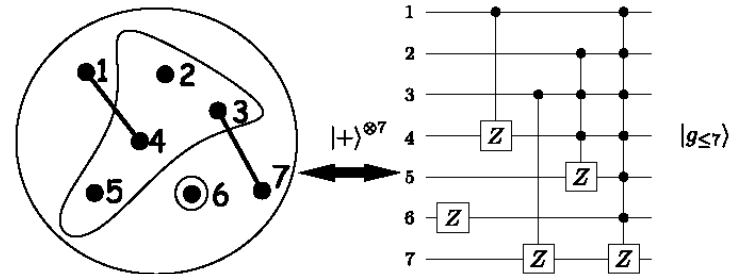
key rates for $N=2,3,\dots,8$ from left to right

HD hypergraph states

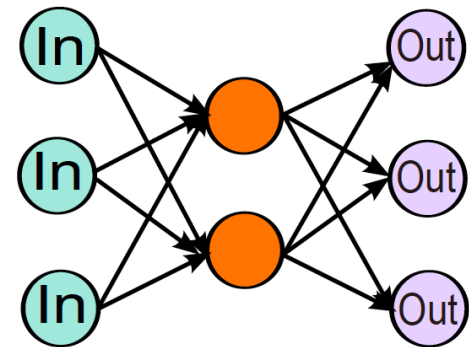
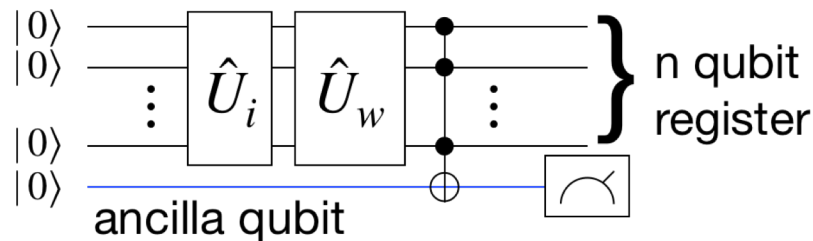
Analysis of **entanglement properties** of HD hypergraph states:

- they play a fundamental role in quantum algorithms
- interesting nonclassical properties

Eg: $|\psi_i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} (-|000\dots 00\rangle + |000\dots 01\rangle \dots - |111\dots 11\rangle)$

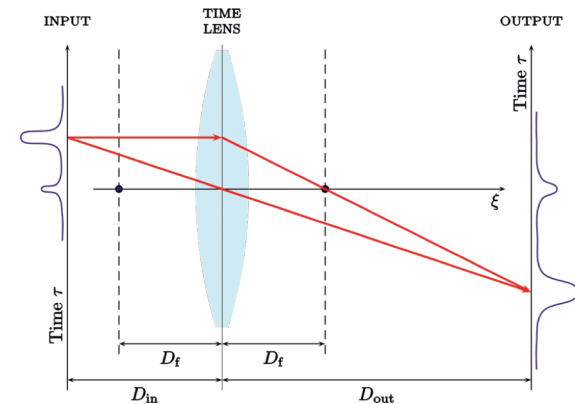


- recently employed in novel **quantum model of artificial neuron** and neural networks

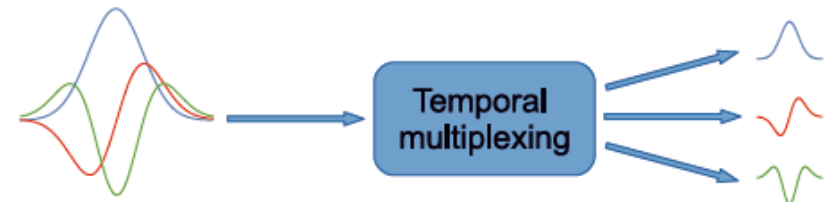


Quantum temporal imaging

- **Theory of noiseless compression** and stretching of temporal waveforms carrying HD quantum encoding

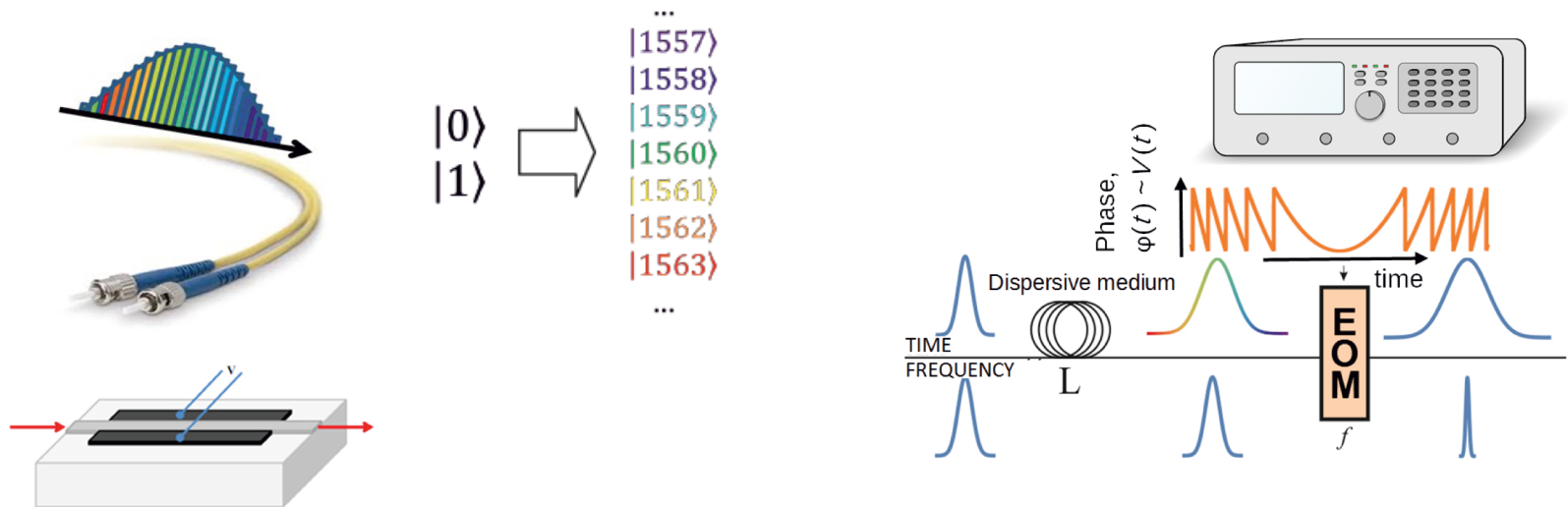


- **Theory of temporal multiplexing** of temporal waveforms carrying HD quantum encoding



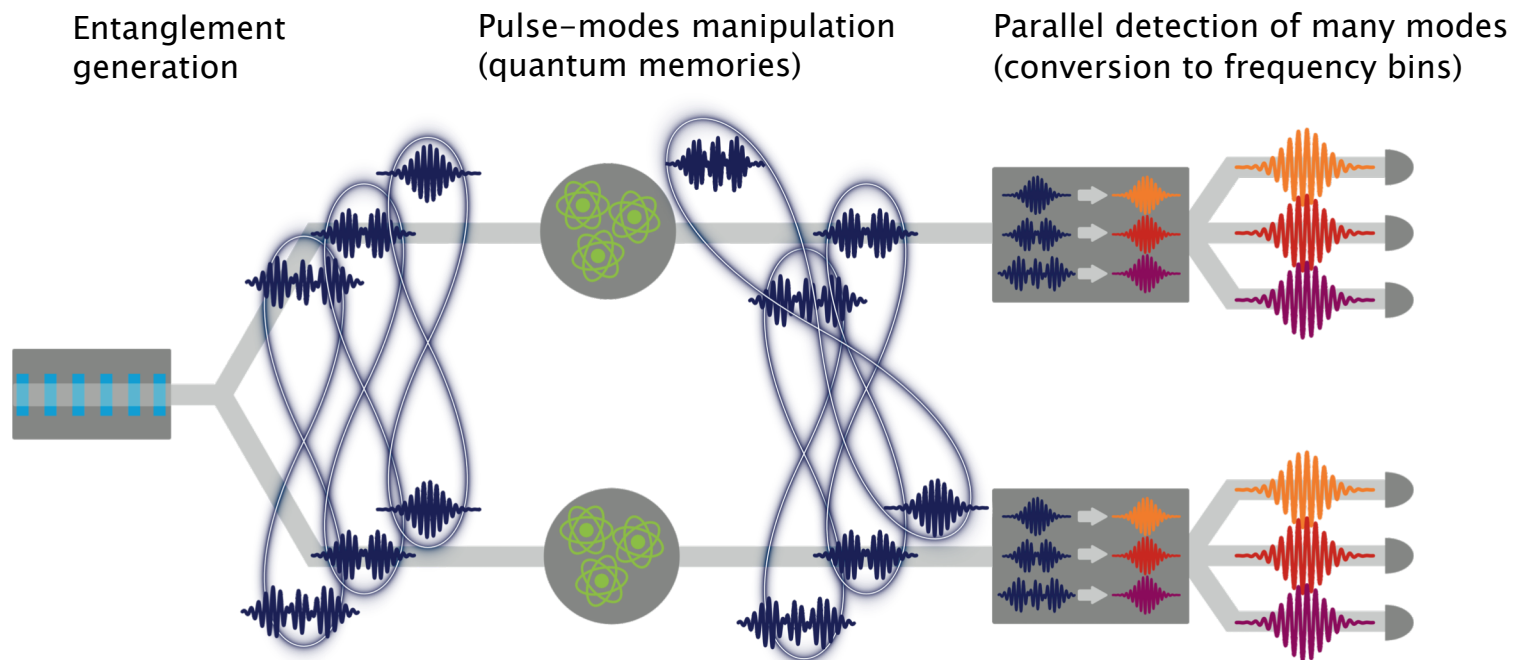
Time-frequency bins

- Encoding in the bases of time and frequency bins naturally compatible with direct single photon detection
- Development of **general measurement schemes** in the TF bin basis



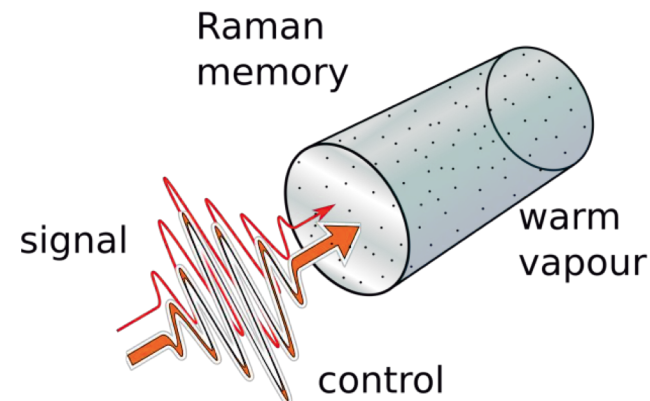
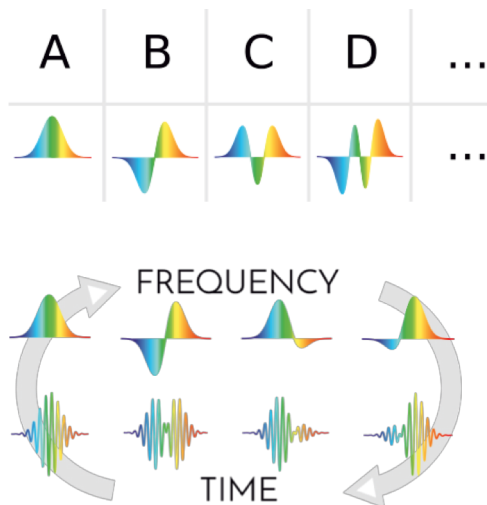
Pulse modes

Develop toolset for HD quantum information protocols based on pulse modes, which comprises of devices and methods for the generation, manipulation, detection and verification of user-defined pulse modes structures



Applications with HD encodings

- Demonstration that **HD schemes for QKD** surpass the secret key rate of two-dimensional schemes
- Realisation of **devices for quantum temporal imaging** and demonstration of survival of quantum properties
- Implementation of **flexible interfaces** between pulse modes and TF bins for use in hybrid encoding networks



QuICHE



- Starting date: 1st March 2020; duration: 3 years
- Total funding: 1425 kE
- Kickoff meeting: 23-24 March 2020, Lille (FR)

THANK YOU!