

R&D per progetti di Fisica Fondamentale con Tecnologie Quantistiche

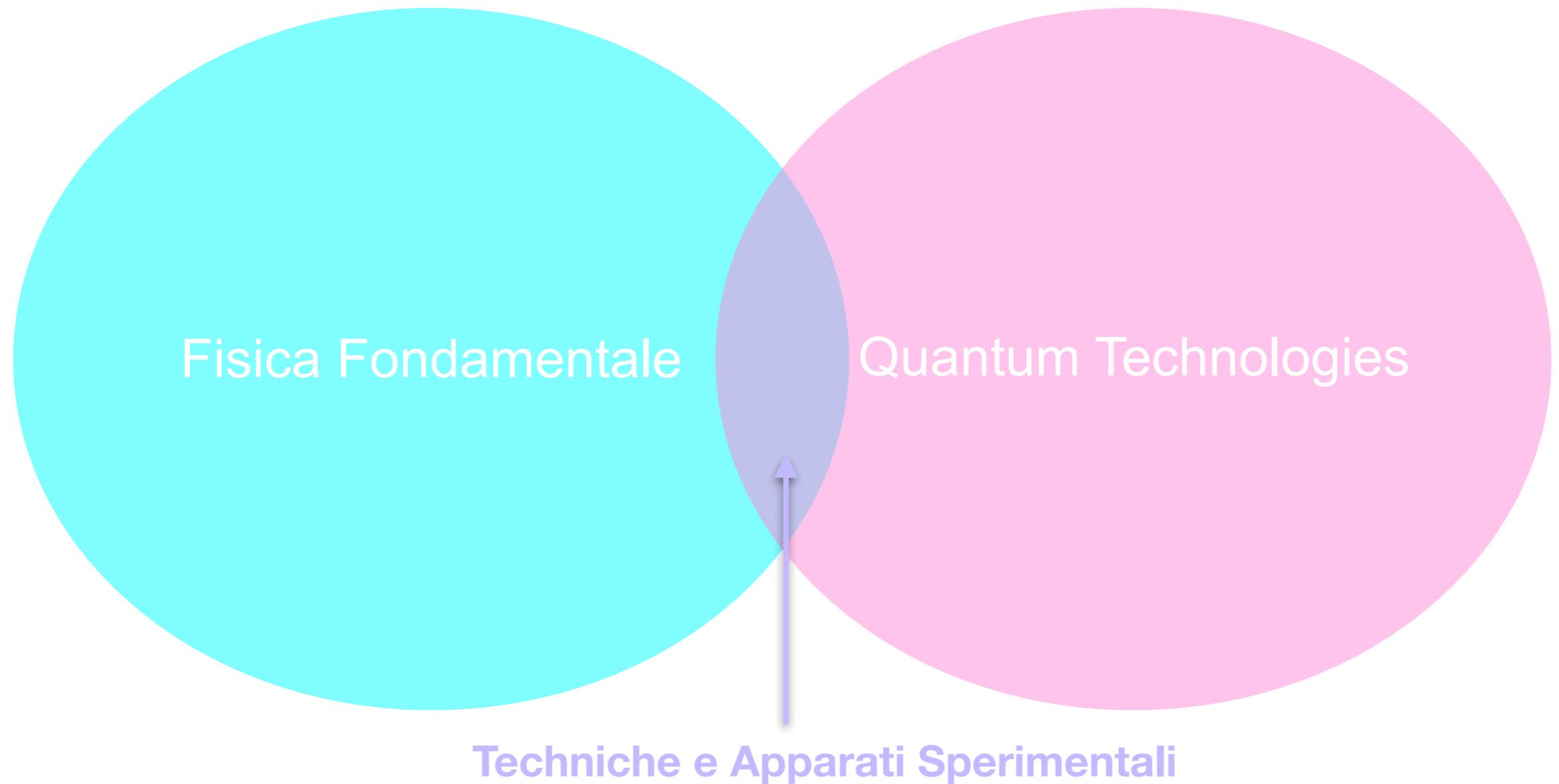


Andrea Tartari (INFN Pisa)

andrea.tartari@pi.infn.it

(con contributi da G. Lamanna, F. Palla, G. Signorelli, P. Spagnolo)

Motivazione



- **Quali ambiti della Fisica Fondamentale?**
 - ▶ Cosmic Microwave Background (CMB): Fisica dell'Universo Primordiale (Inflazione)
 - ▶ Ricerca di Dark Matter: Assioni
 - ▶ Ricerca di Dark Matter: WIMPs (CDMS, CRESST)
 - ▶ Astrofisica delle Alte Energie
 - ▶ Fisica delle Alte Energie
- **Quali Tecnologie Quantistiche?**
 - ▶ Tecnologie Superconduttive (e.g., Google Sycamore, IBM-Q)
 - ▶ Fotonica del Silicio

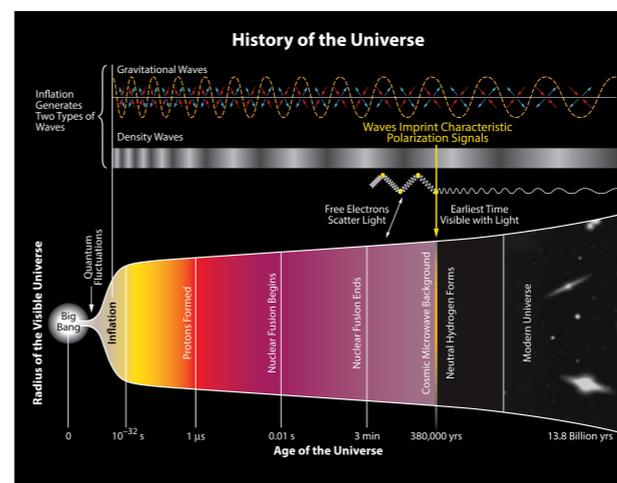


Image Credit: BICEP-KECK Coll.

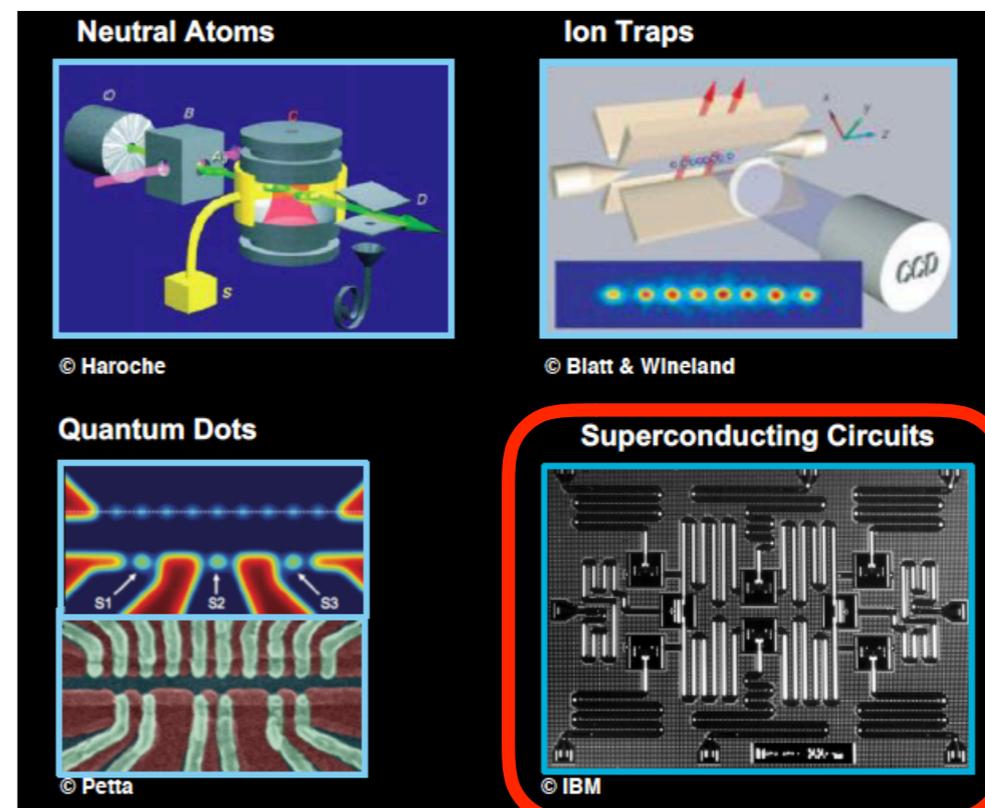
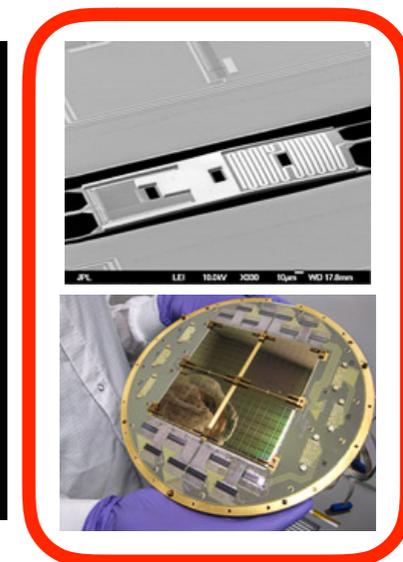
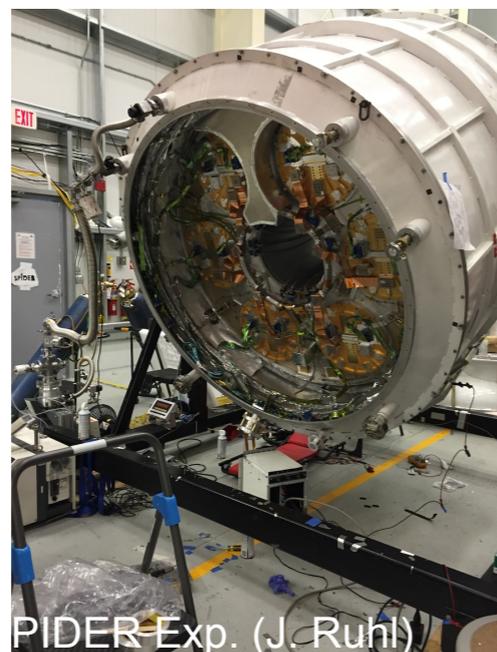
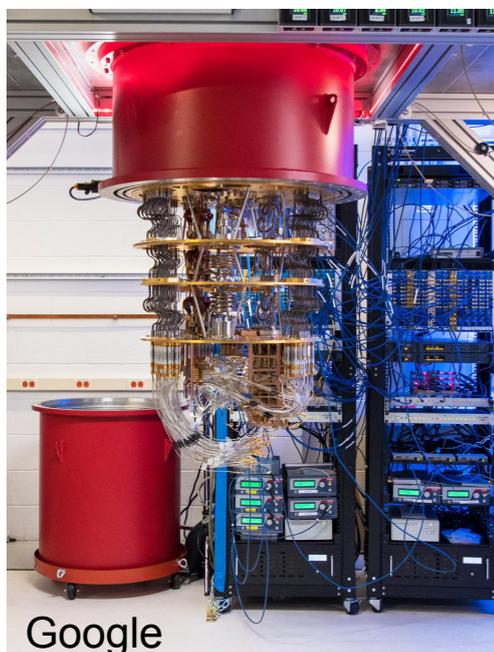


Image Credit: I. Tavernelli

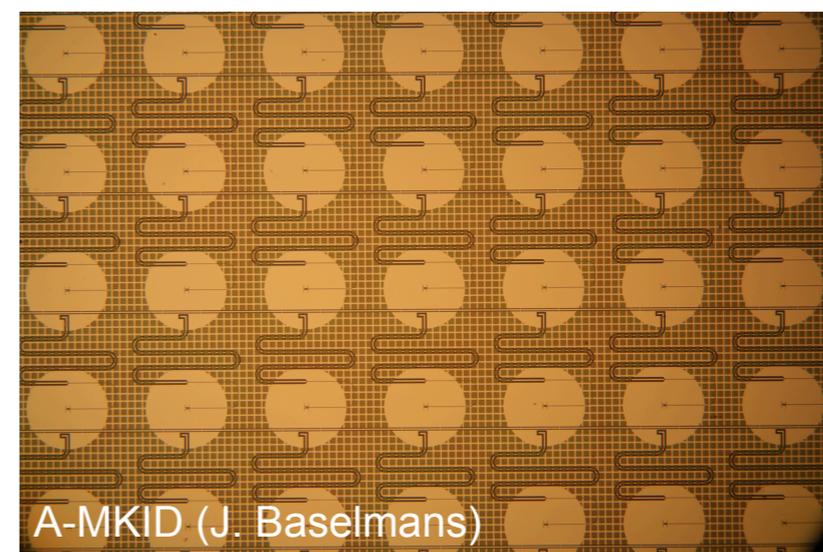
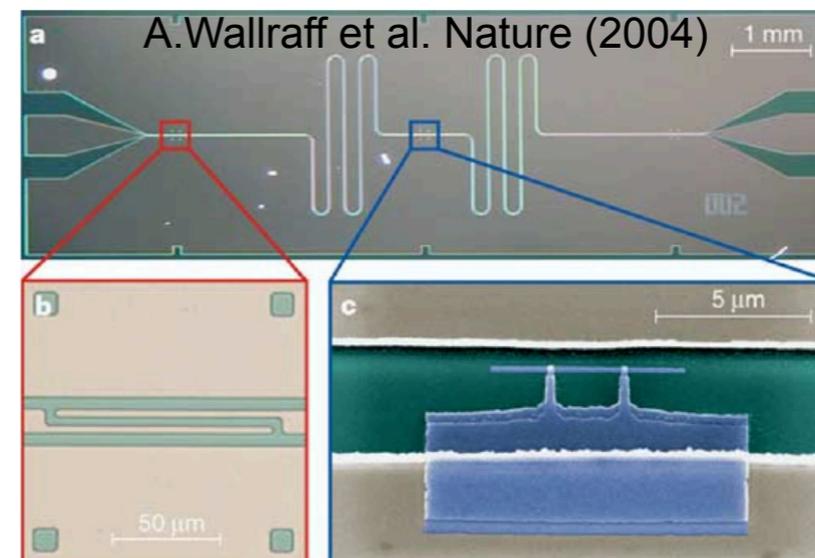
L' intersezione - I

Tecniche e apparati sperimentali (alcuni esempi)

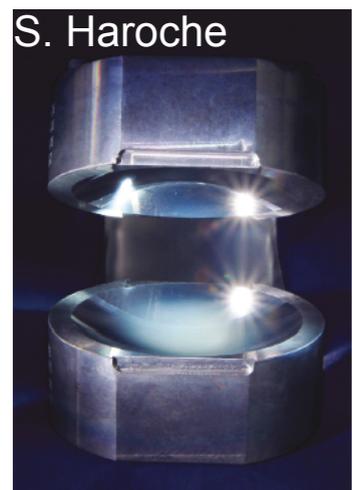
Freddo estremo (10 mK-100 mK)



Dispositivi Superconduttivi



Interazione luce-materia in cavità

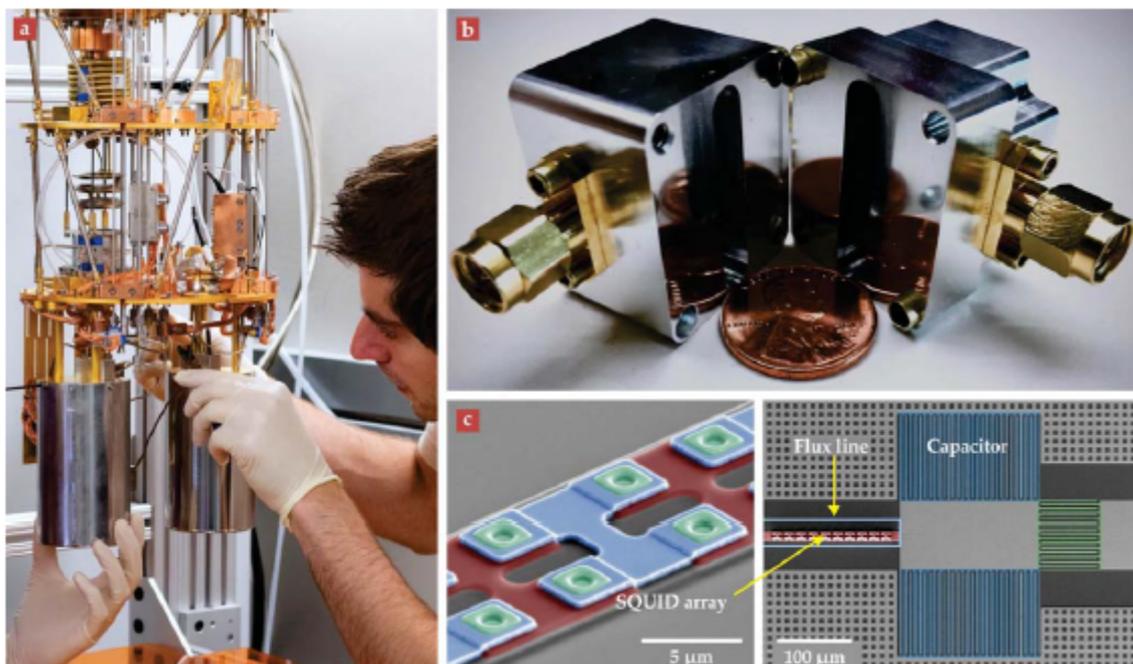


Tecniche e apparati sperimentali (alcuni esempi)

Amplificazione “noiseless”

Putting the squeeze ON AXIONS

Bibber, Lehnert & Chou, Physics Today, 2019
HAYSTAC experiment



Manipolazione coerente della luce con la fotonica del silicio

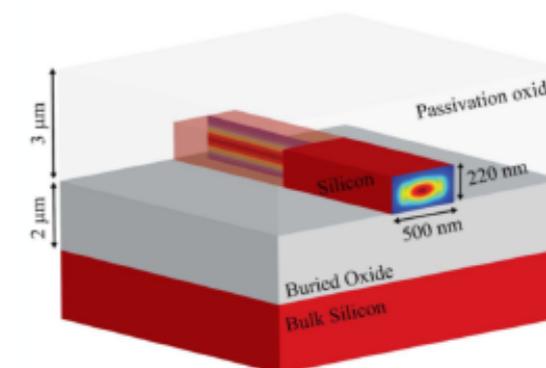


“Graphic representation of an integrated quantum optics controlled-NOT chip. Single photons (represented as flashes) propagate on the chip, confined by silica waveguides, and are then coupled into optical fibers for detection.”

credit: F. Palla, Fabrizio.Palla@cern.ch



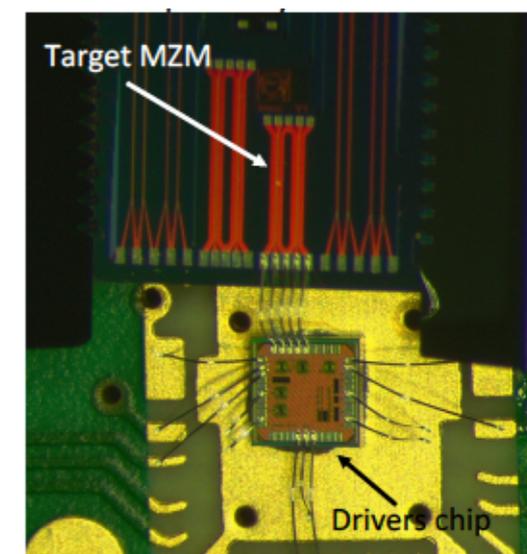
$\lambda = 1550nm$



- Futuri colliders - scala di HL-LHC e oltre: data rate attesi nei rivelatori interni ~ decine Gb/s per cm².

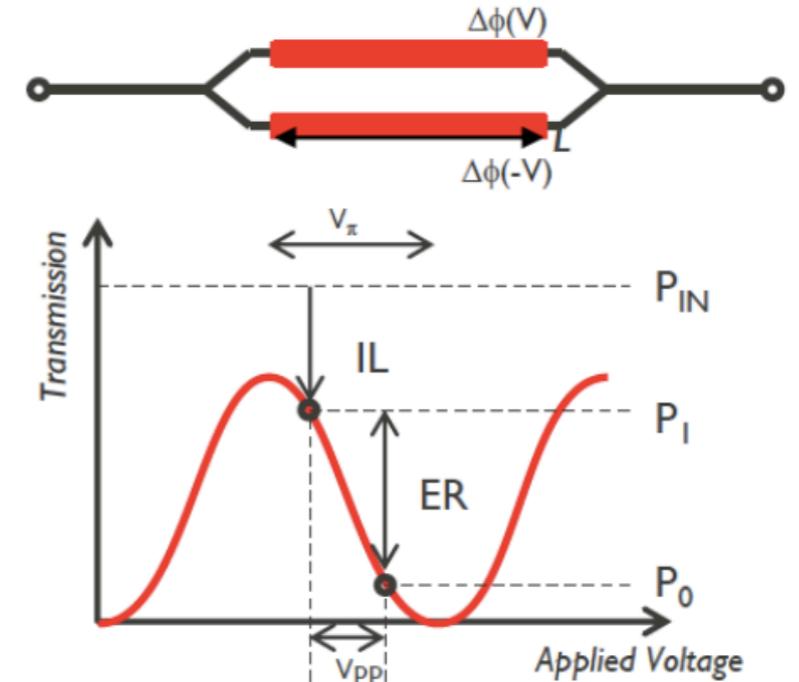
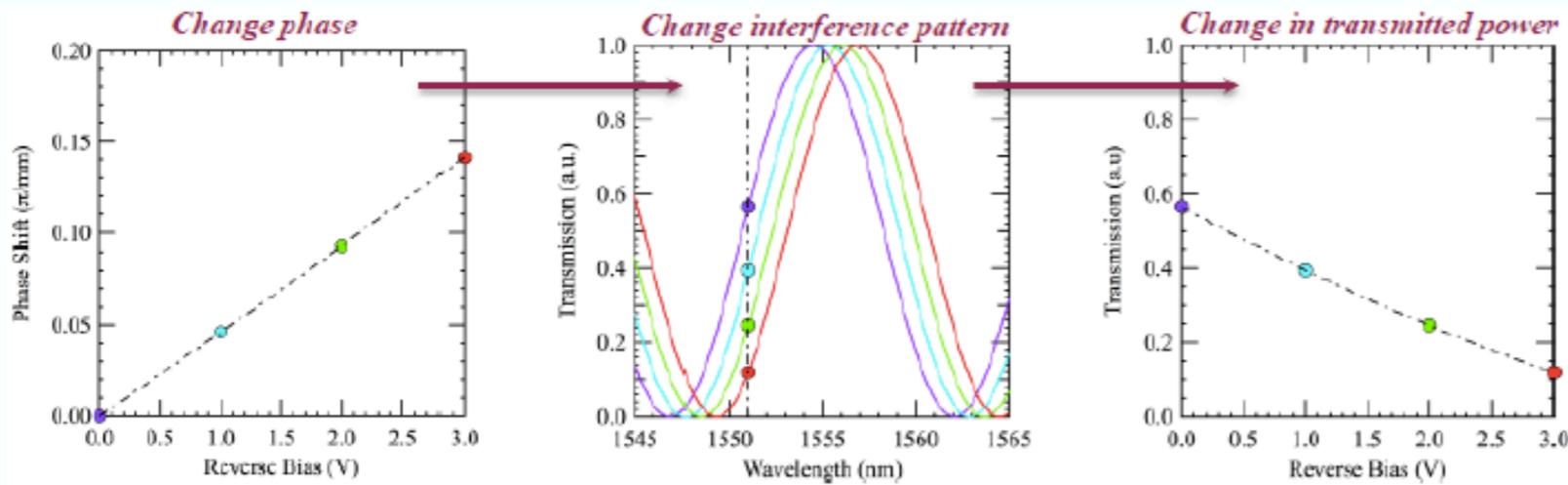
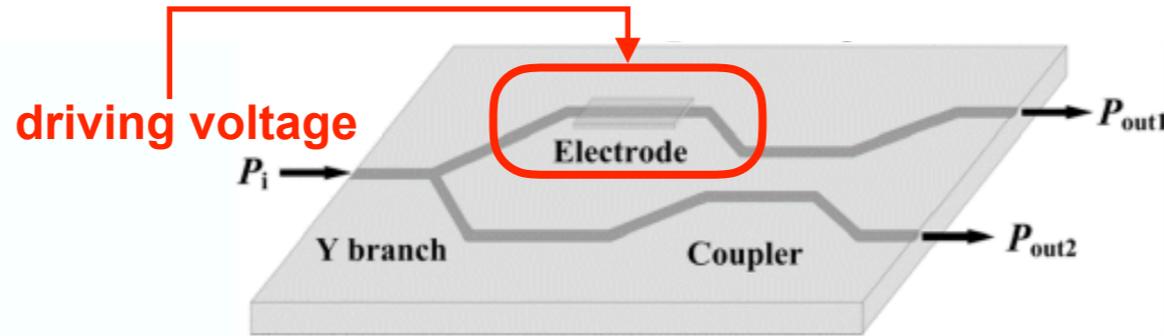
▶ necessità di link ottici ad elevata capacità, basati su componenti rad-hard

- ➔ Guide d'onda in silicio. Variazione dell'indice di rifrazione vs. tensione
- ➔ Modulazione di fase di un laser NIR
- ➔ Modulatore (rad-hard): un voltage driver in tecnologia 65 nm connesso al front-end



PHOS4BRAIN (HEP)

Mach-Zehnder Interferometer



- ➡ Trasposizione di due stati logici (“0”, “1”) in due diversi valori della Optical Modulation Amplitude all’uscita del Mach-Zender.
- ➡ Raggiunti 5Gb/s

Sensori Superconduttivi

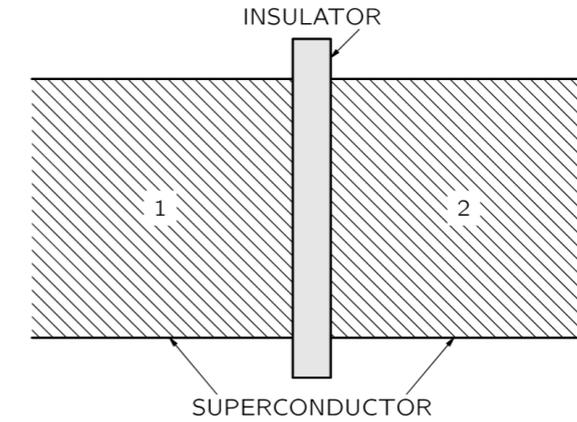
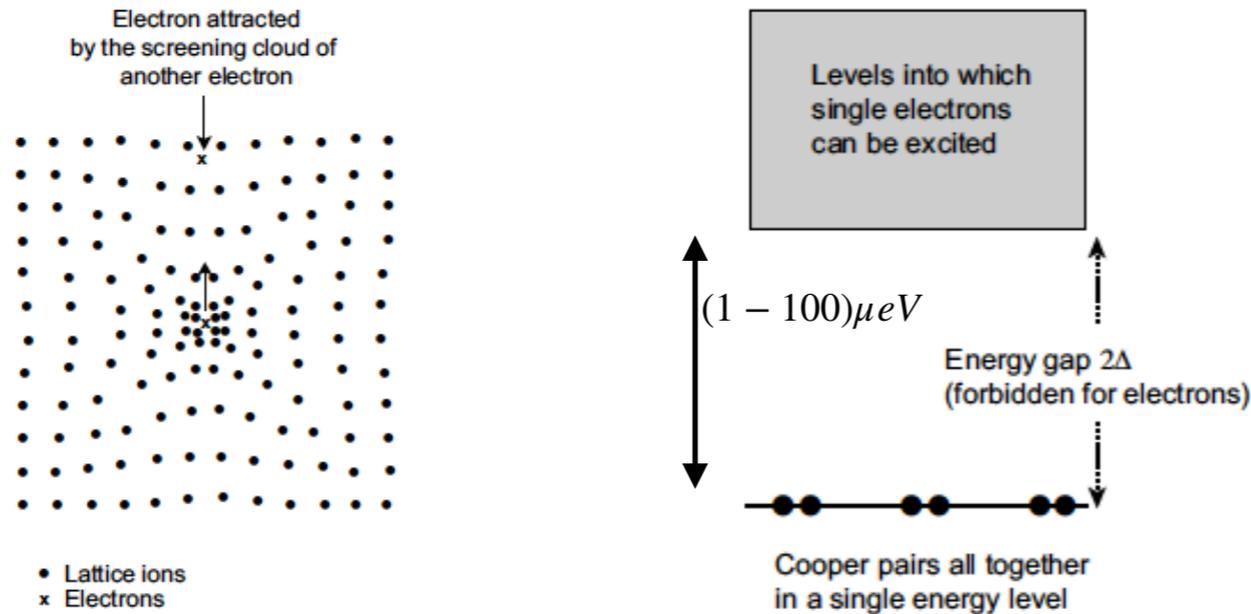
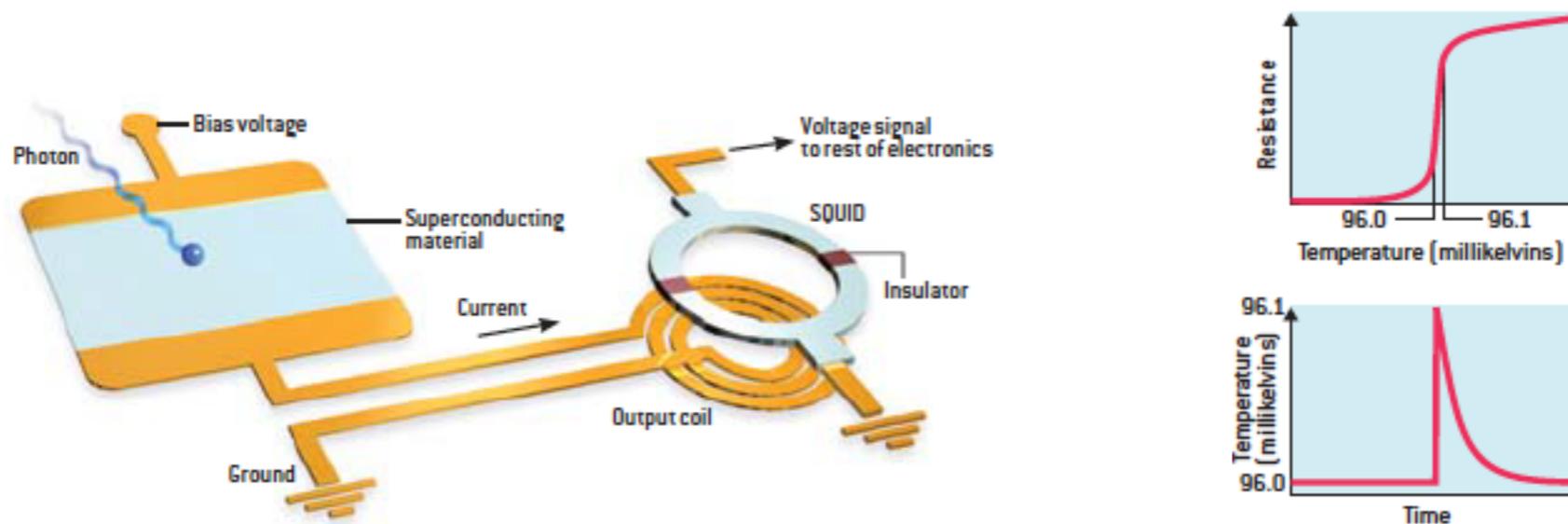


Fig. 21-6. Two superconductors separated by a thin insulator.

JJ - Il mattone fondamentale

K. Irwin, "Seeing with Superconductors", Scientific American 2006

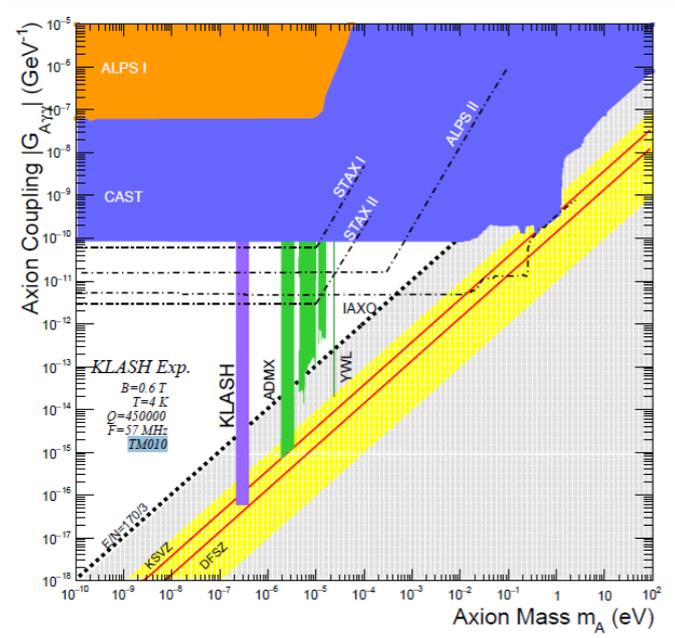
"The fragility of superconductivity is the feature that makes it ideally suited for sensitive detectors"



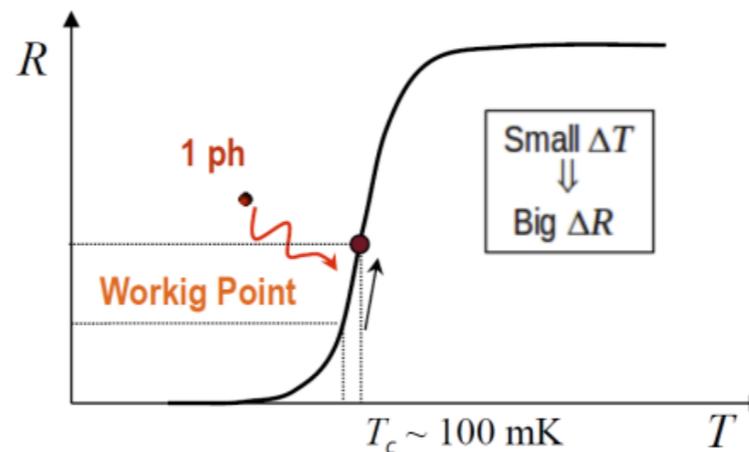
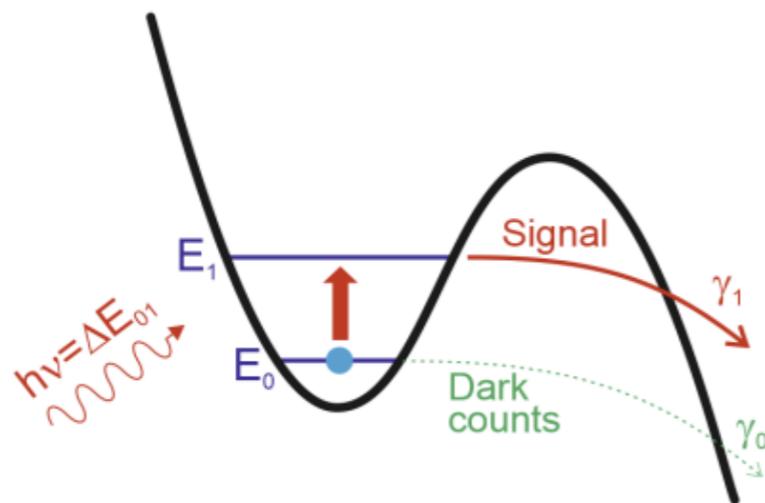
SIMP (Axions)

credit: G. Lamanna/P. Spagnolo, Paolo.Spagnolo@cern.ch, gianluca.lamanna@pi.infn.it

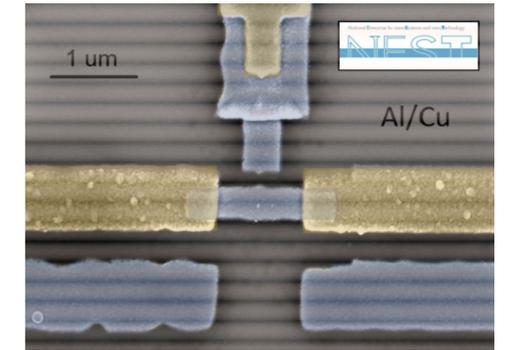
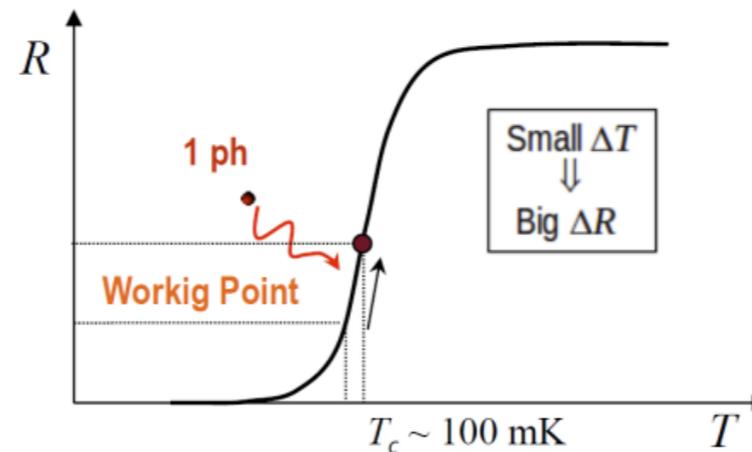
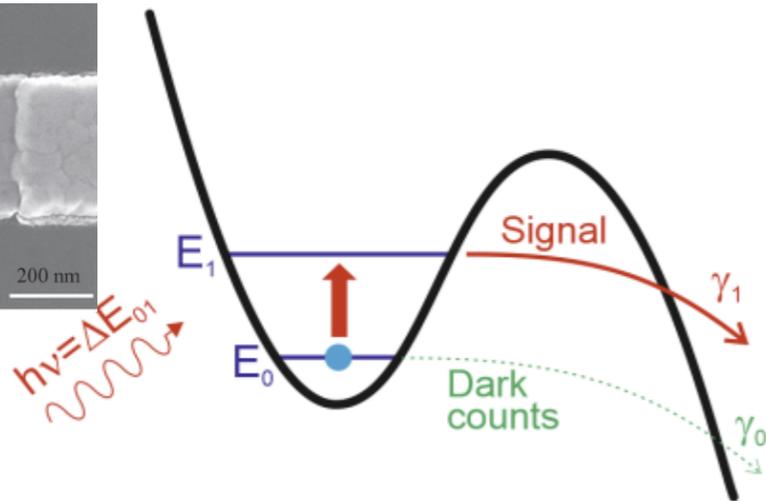
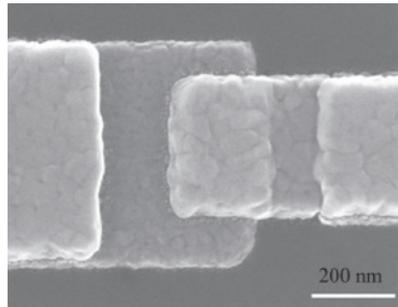
Single Microwave Photon detection



- Eventi rari, come la ricerca di assioni, necessitano di una nuova classe di rivelatori di singolo fotone. Interesse nell'INFN: PVLAS, QUAX, AXIOMA, STAX, KLASH. Molte di queste applicazioni sono nel range delle microonde.
- Due opzioni considerate:
 - ▶ Current biased JJ device: LNF, Salerno, CNR-IFN
 - ▶ TES bilayer: Pisa, CNR-NANO, TIFPA, INRIM



SIMP (Axions)



Preparare un sistema a due stati:

- Uno stato «zero», quando il sistema è in minimo di un certo potenziale
- Uno stato «uno», quando il sistema è stato eccitato
- Lo stato «uno» ha una probabilità di fare effetto tunnel nel continuo, e quindi di produrre un segnale in corrente, molto più alta dello stato fondamentale.
- L'effetto tunnel nello stato fondamentale non ha probabilità nulla a dark count dell'ordine del MHz (per fotoni tra 10 e 50 GHz)
- R&D per diminuire il dark count sotto l'Hz (ottimizzazione del design attuale e nuove idee)

- Obiettivo di SIMP è costruire TES di singolo fotone tra 30 e 100 GHz:
 - ▶ Buona risoluzione di energia
 - ▶ Bassa temperatura di transizione
- Bilayer Cu/Al (constant Al: 10 nm)

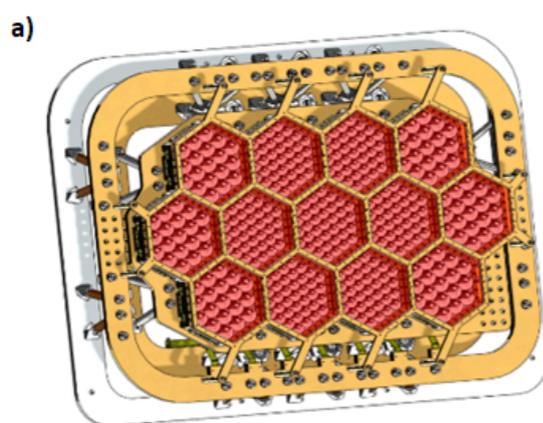
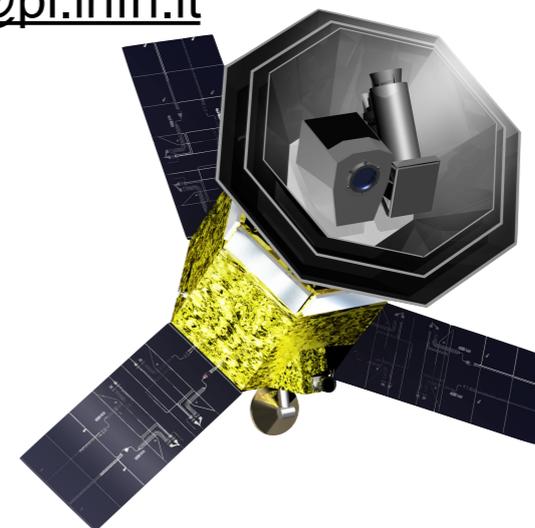
Possibile tuning della T_c con la corrente di bias →
 $T_c=50\text{mK} \rightarrow 1.04 \text{ GHz}$

+ Antenna Coupling

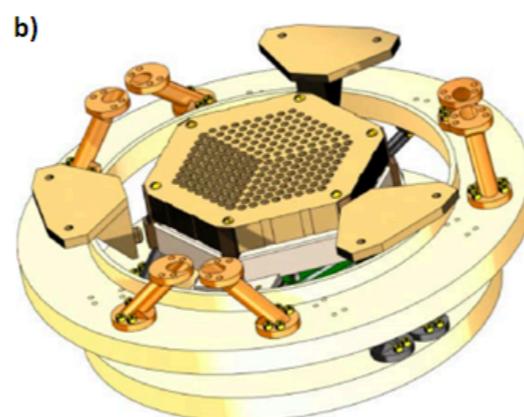
LiteBIRD (CMB)

contatto: G. Signorelli/AT, giovanni.signorelli@pi.infn.it

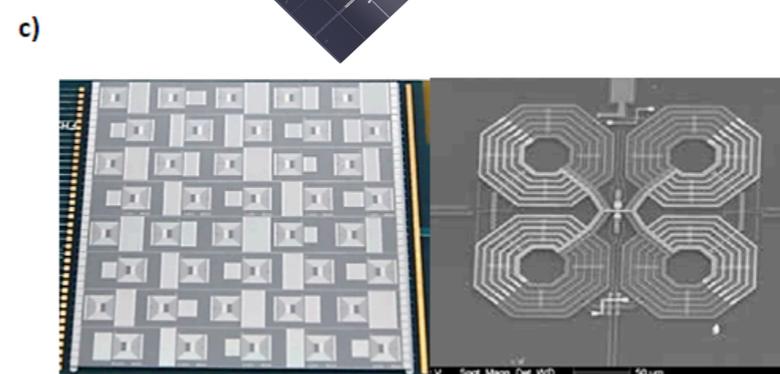
- **Misurare la scala di energia dell'Inflazione**
 - ➔ Array di TES antenna-coupled a 100 mK
 - ➔ Elettroniche di lettura superconduttive



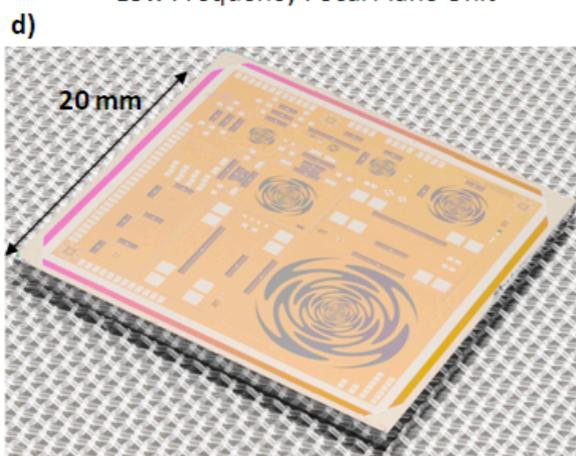
Low Frequency Focal Plane Unit



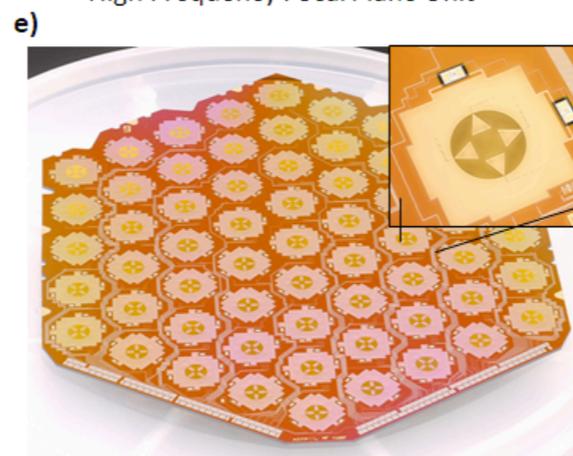
High Frequency Focal Plane Unit



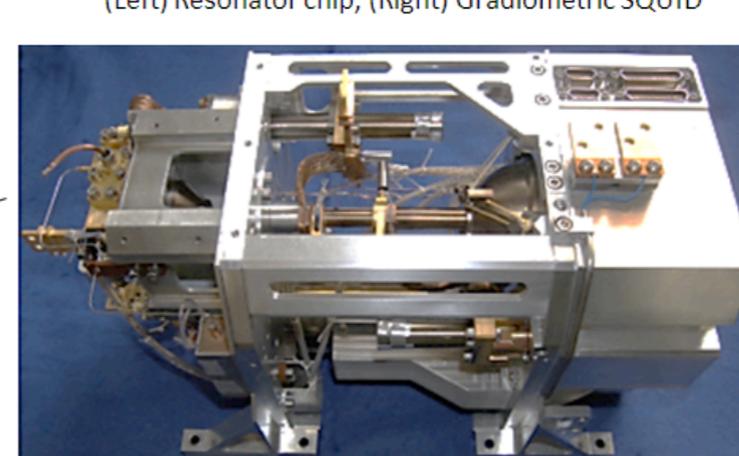
Cold Readout Electronics
(Left) Resonator chip, (Right) Gradiometric SQUID



Sinuous antenna test chip



OMT coupled detector array

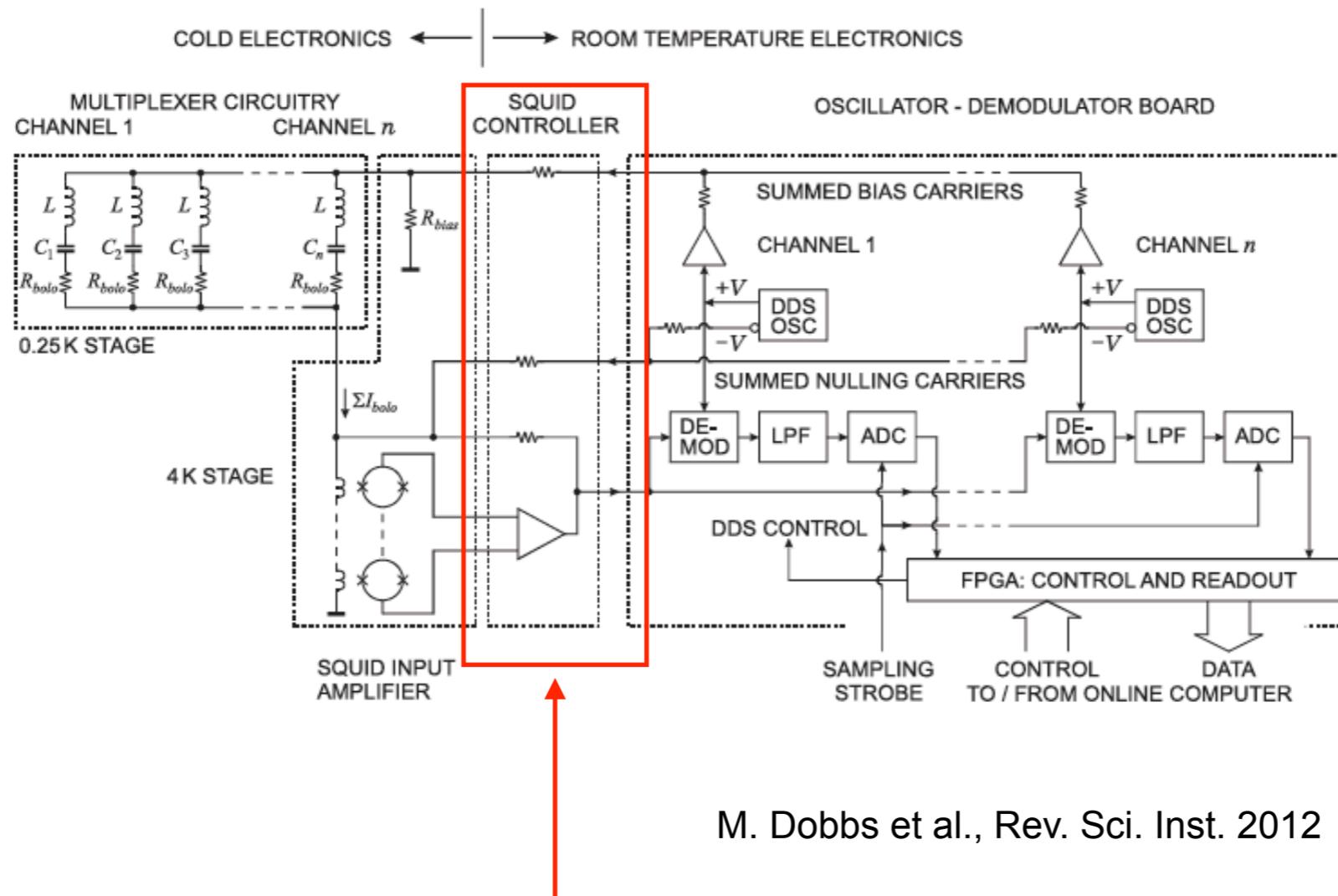


Sub-Kelvin Cooler

A. Suzuki, J Low Temp Phys 2018

LiteBIRD (CMB)

- Frequency Division Multiplexing (generazione di un frequency comb, demodulazione omodina in IQ).
- Readout basato su amplificatori di corrente a dc-SQUID, $T < 1K$.



M. Dobbs et al., Rev. Sci. Inst. 2012

Conclusioni

- La manipolazione coerente della luce e la detenzione a basse temperature sono fra gli argomenti chiave delle quantum technologies. E potenzialmente porte di ingresso in questo ambito di ricerca per chi ha una formazione in fisica fondamentale.
- Trasferimento di conoscenze.
- ✓ Iniziativa di DOE (21M\$) per quantum sensing/information in HEP (08/2019).
- ✓ Diverse comunità scientifiche mutuamente permeabili (workshops, conferenze).



“Efforts will range from the development of highly sensitive quantum sensors for the detection of rare particles, to the use of quantum computing to analyze particle physics data, to quantum simulation experiments connecting the cosmos to quantum systems.”