

Transition Edge Sensor per la misura diretta della massa del neutrino: l'esperimento **HOLMES**

Matteo Borghesi
a nome della collaborazione di HOLMES

Università di Milano-Bicocca e INFN-Sezione di Milano-Bicocca

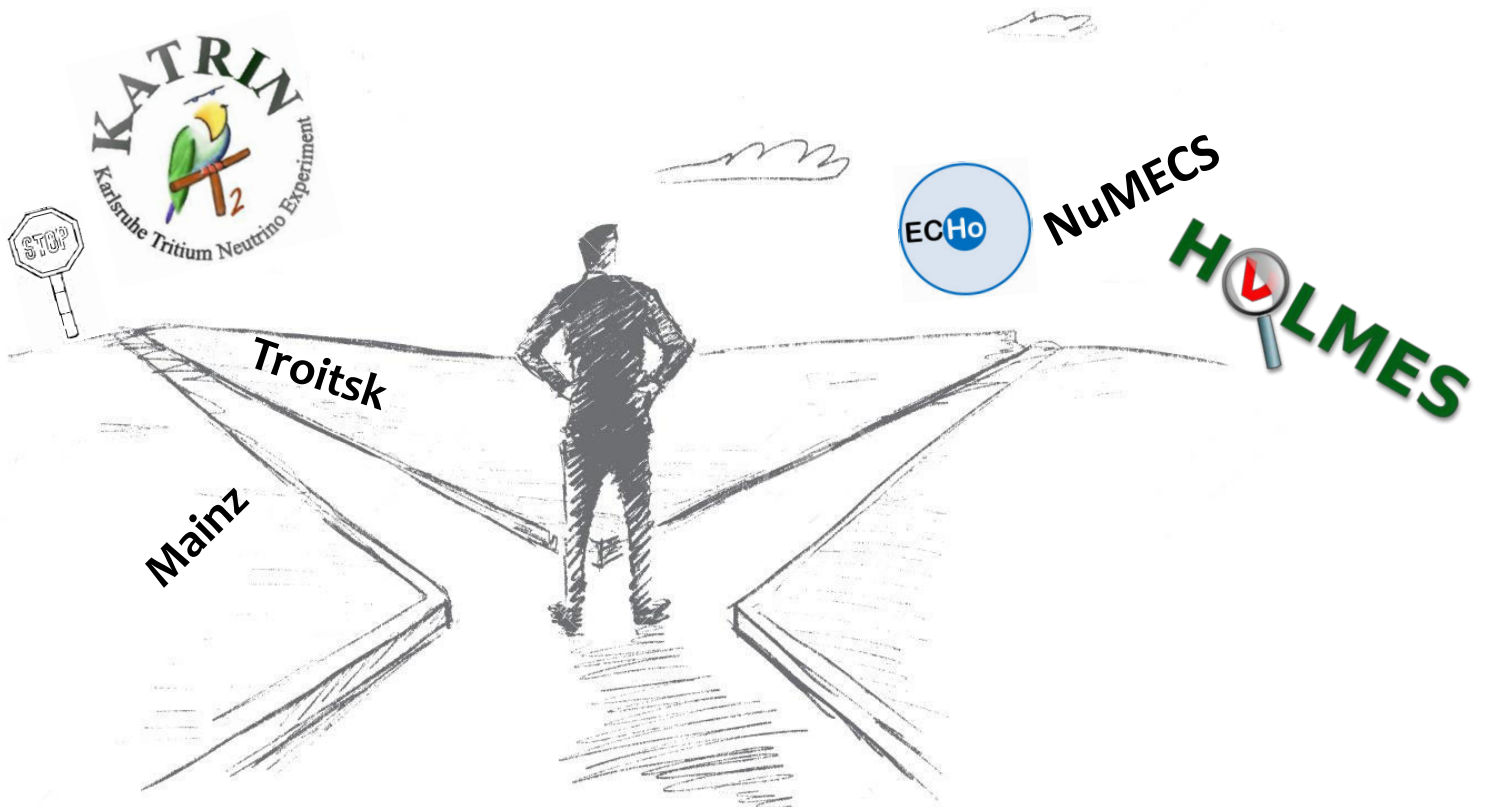


European Research Council
Established by the European Commission



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Alla ricerca della massa del neutrino



Che strada scegliere?



Oscillazioni

- $\Delta m_{atm}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
- $\Delta m_{solar}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

Cosmologia

$$m_{\Sigma} = \sum_i m_i < 0.23 \text{ eV}$$

Decadimento β

- $m_{\bar{\nu}_e} < 2.05 \text{ eV}$ (95% CL) Troitsk
- $m_{\bar{\nu}_e} < 2.3 \text{ eV}$ (95% CL) Mainz

- $m_{\bar{\nu}_e} < 26 \text{ eV}$ (95% CL) MANU
- $m_{\bar{\nu}_e} < 15 \text{ eV}$ (90% CL) MIBETA

Spettrometri

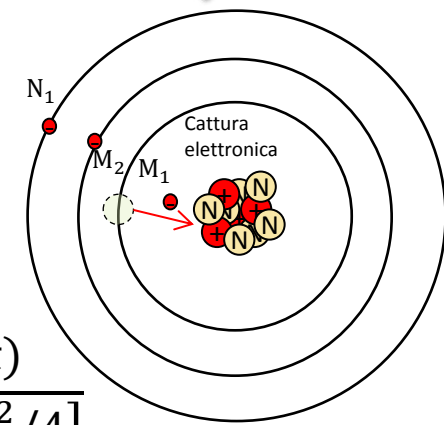
$$\tau_{1/2}(^3H) = 12.3 \text{ anni}$$

- ▲ La sorgente è esterna al rivelatore
- ▲ Misura gli elettroni nel range di energia di interesse
- ▲ Alta statistica
- ▼ Sistematiche dovute ad effetti della sorgente (perdita di energia nella sorgente, backscattering...)
- ▼ Sistematiche dovute al decadimento in stati eccitati
- ▼ Background

Calorimetri $\tau_{1/2}(^{187}Re) \simeq 4 \times 10^{10} \text{ anni}$ $\tau_{1/2}(^{163}Ho) \simeq 4570 \text{ anni}$

- ▲ Sorgente interna al rivelatore
- ▲ Misura tutta l'energia rilasciata nel decadimento, eccetto quella del $\bar{\nu}_e$
- ▼ Bassa statistica
- ▼ Pile-up!
- ▼ Background

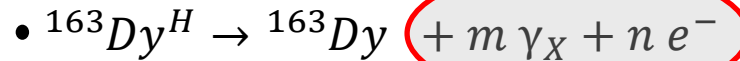
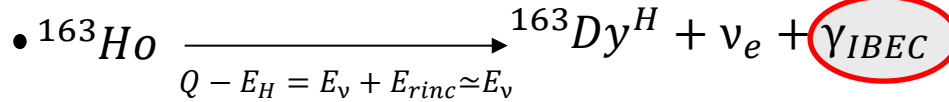
Cattura elettronica (EC)

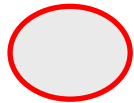


EC

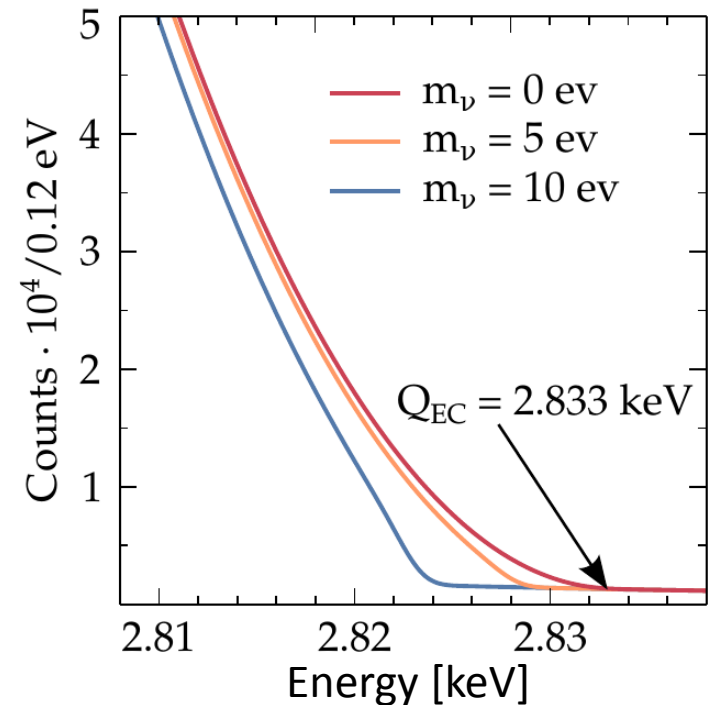
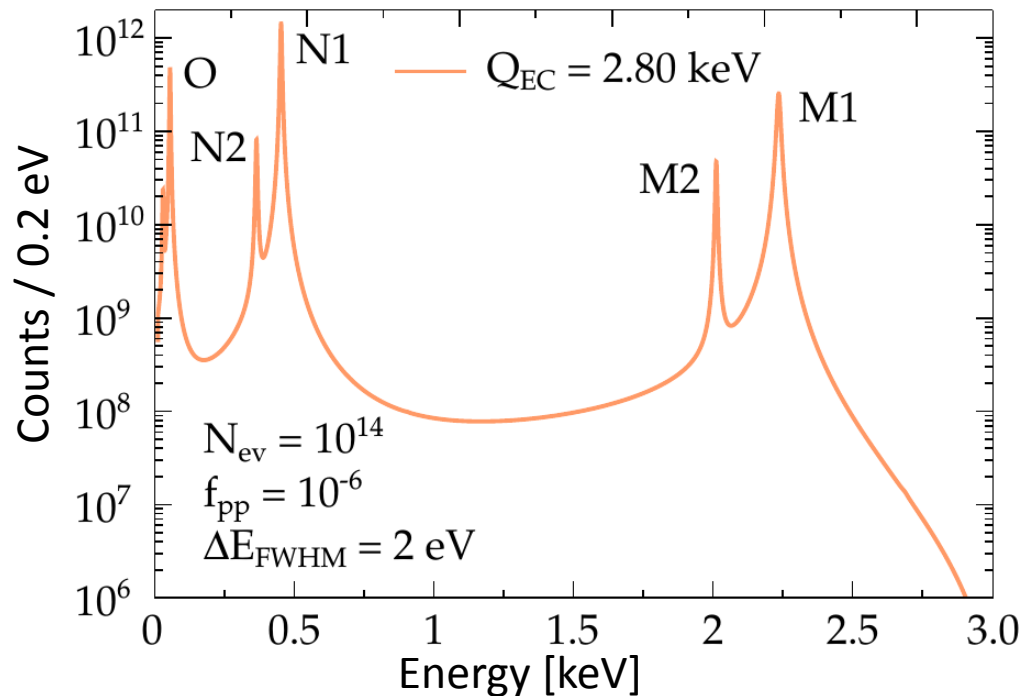


^{163}Ho $Q = 2.833 \text{ keV}$

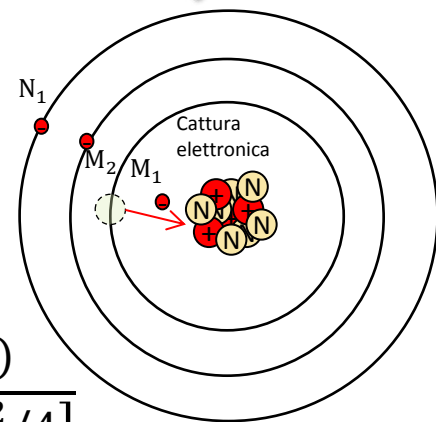


 = E_C

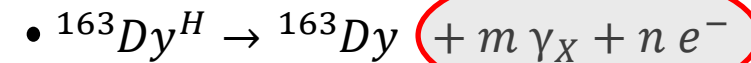
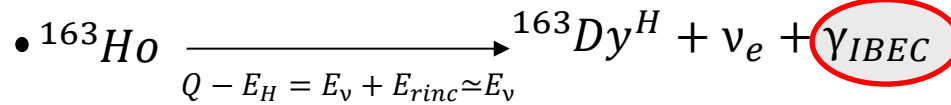
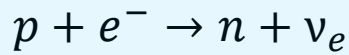
$$\frac{dW}{dE_C} = N(Q - E_C) \sqrt{[(Q - E_C)^2 - m_\nu^2]} \times \sum_H \frac{\varphi_H^2(0)(\Gamma_H/2\pi)}{[(E_C - E_H)^2 + \Gamma_H^2/4]}$$



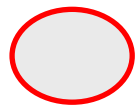
Cattura elettronica (EC)



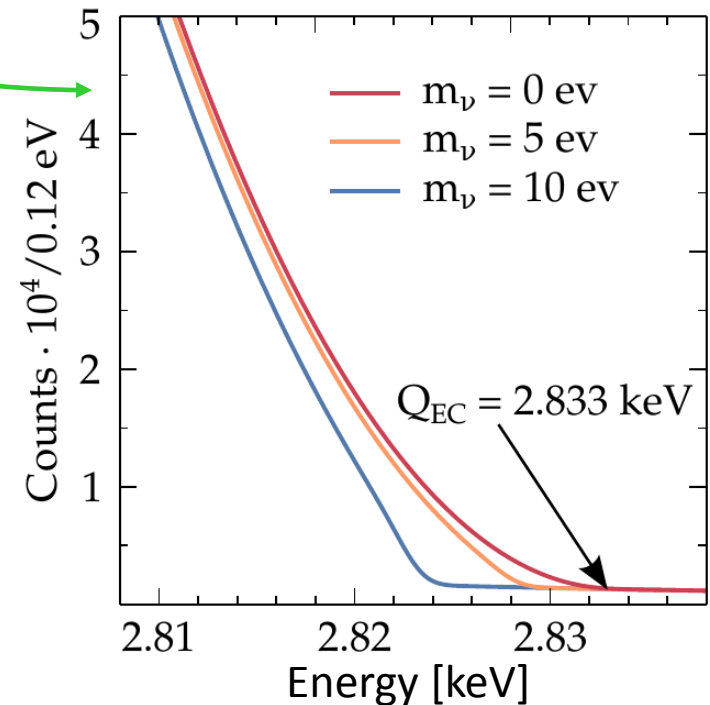
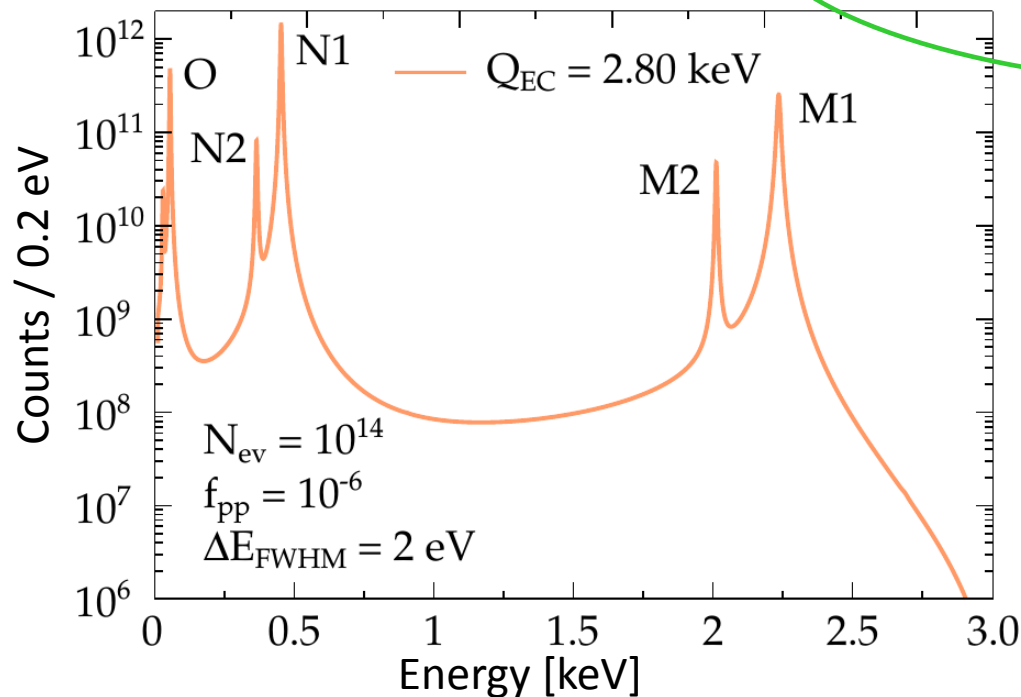
EC



$^{163}\text{Ho} \quad Q = 2.833 \text{ keV}$

 = E_C

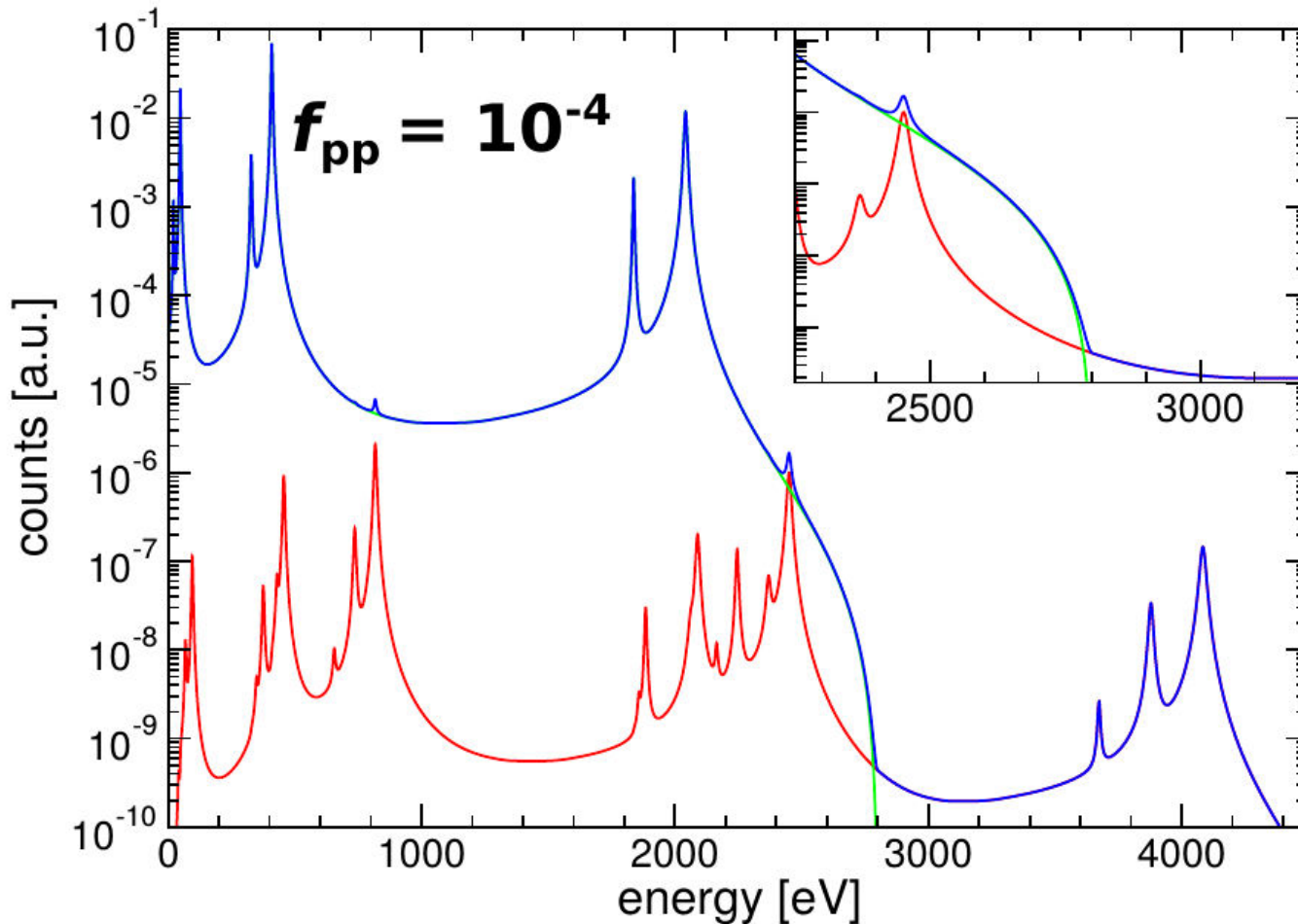
$$\frac{dW}{dE_C} = N(Q - E_C) \sqrt{[(Q - E_C)^2 - m_\nu^2]} \times \sum_H \frac{\varphi_H^2(0)(\Gamma_H/2\pi)}{[(E_C - E_H)^2 + \Gamma_H^2/4]}$$



- N Numero di atomi , $T_{1/2}$ tempo di dimezzamento, Δt risoluzione temporale

Spettro delle coincidenze
accidentali

$$\frac{dA}{dE_C} = \frac{N\Delta t \ln 2}{T_{1/2}} \frac{1}{W^2} \int dE_1 dE_2 \frac{dW}{dE_1} \frac{dW}{dE_2} \delta(E_C - E_1 - E_2)$$



HOLMES



PI: Stefano Ragazzi



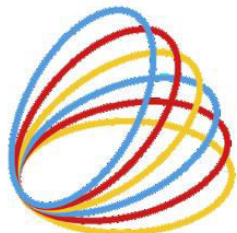
European Research Council
Established by the European Commission

HOLMES

PAUL SCHERRER INSTITUT



NIST



centra



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

UNIVERSITA' DEGLI STUDI
DI MILANO
BICOCCA



NEUTRONS
FOR SCIENCE

Obiettivi:

- Dimostrare la potenzialità di una misura calorimetrica per un futuro esperimento con megapixel
- Misura diretta della massa del neutrino con una sensibilità statistica sotto i 2 eV
- Studio EC ^{163}Ho
 - ↳ Misura del Q-valore calorimetrico
 - Studio della forma dello spettro
 - Ricerca di sistematiche

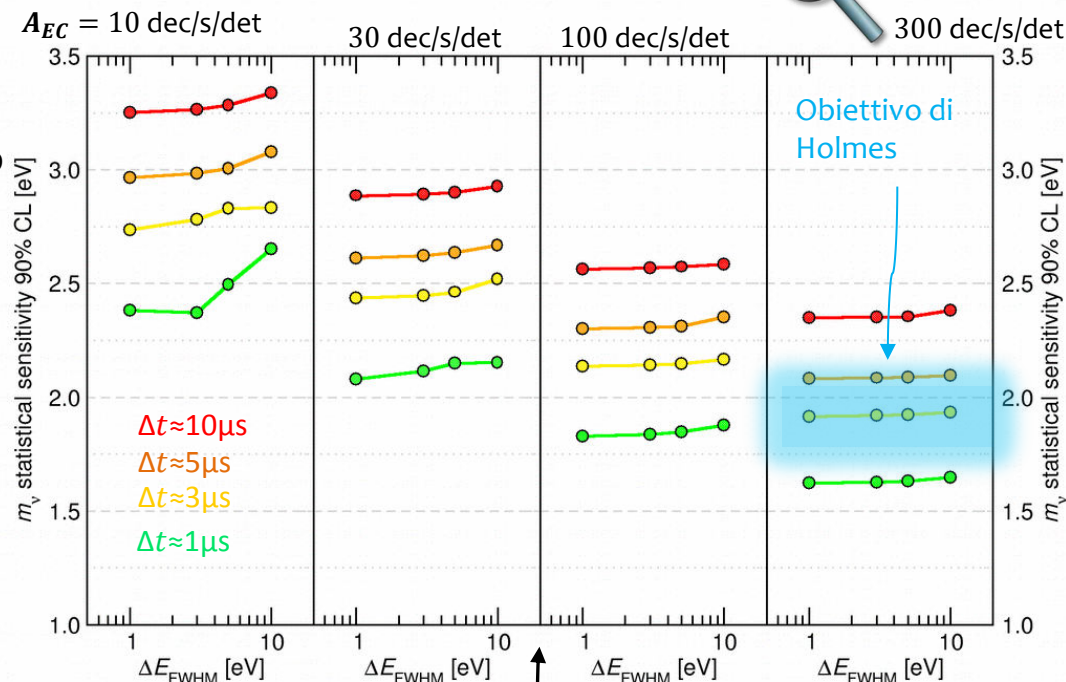
Requisiti:

- Rivelatori TES (Mo/Cu) con l'olmio 163 impiantato nell'assorbitore
 - ↳ 6×10^{13} nuclei per pixel $\Rightarrow A_{EC} = 300 \text{ dec/s/det}$

- Array di 1024 canali (16 subarray da 4x16 rivelatori ciascuno)
 - ↳ 3×10^{13} eventi in 3 anni

Time-line:

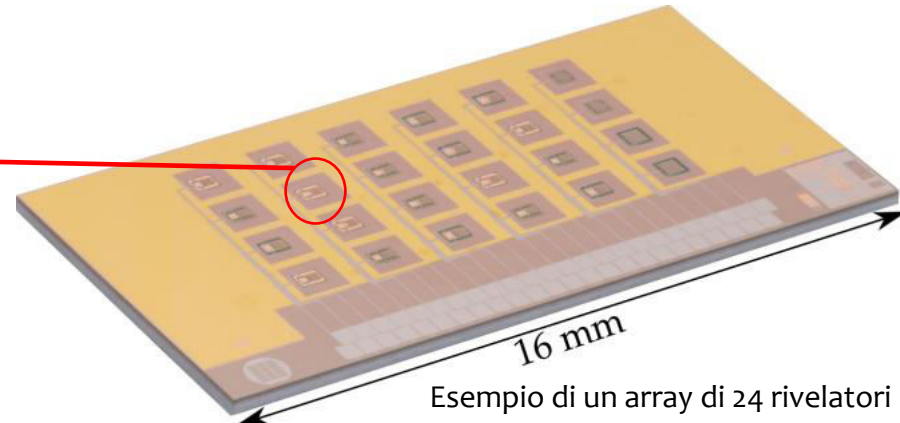
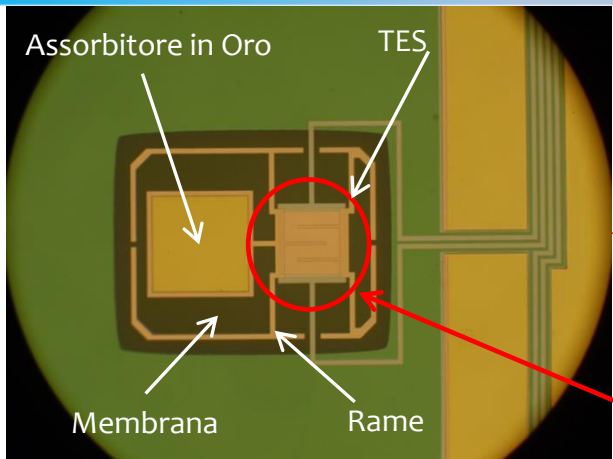
- Misure del primo sub-array di 64 rivelatori attese per la fine del 2018
- Attività attuali (Bicocca) incentrate sull'ottimizzazione delle performance dei rivelatori e del sistema di readout



Transition Edge Sensor

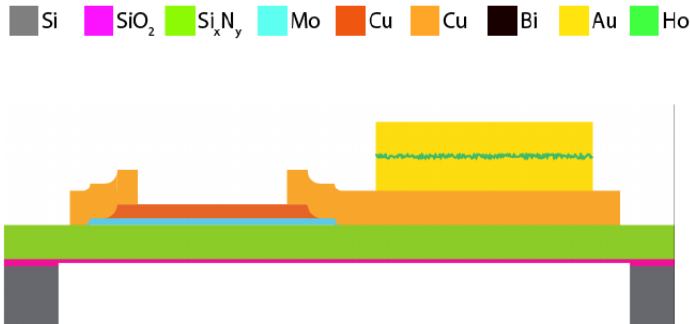


Un rivelatore TES [dall'alto]



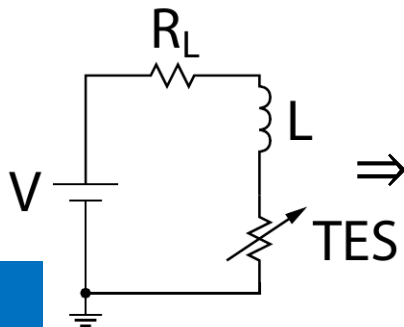
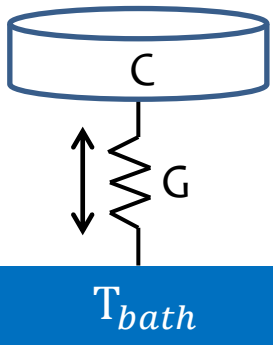
Esempio di un array di 24 rivelatori

Un rivelatore TES [di lato]

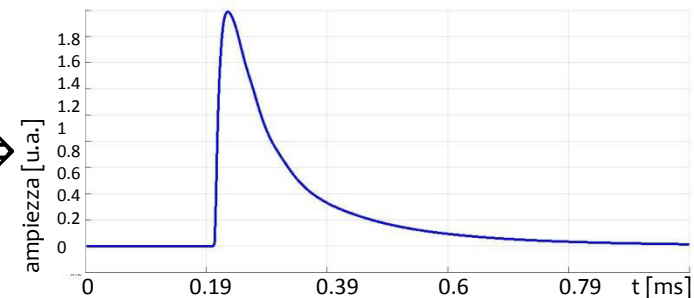
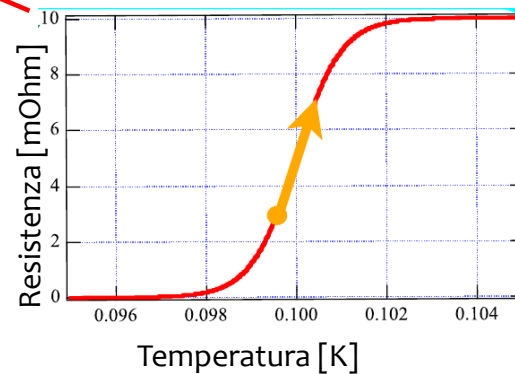


Schema circuito termico associato

Circuito equivalente del bias di un TES



$$\begin{cases} C \frac{dT}{dt} = -P_{bath} + P_J + P \\ L \frac{dI}{dt} = V - IR_L - IR_{TES}(T, I) \end{cases} \Rightarrow$$



Microwave SQUID Multiplexer (μ MUX)



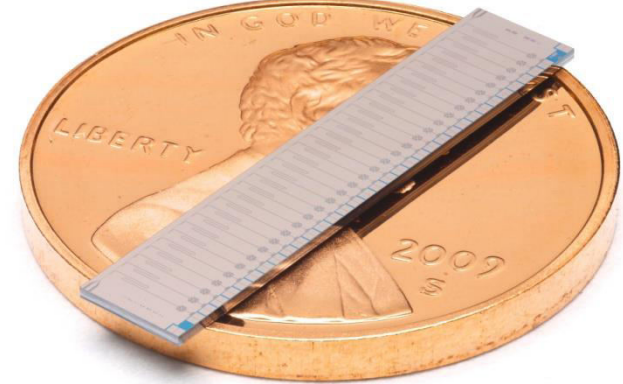
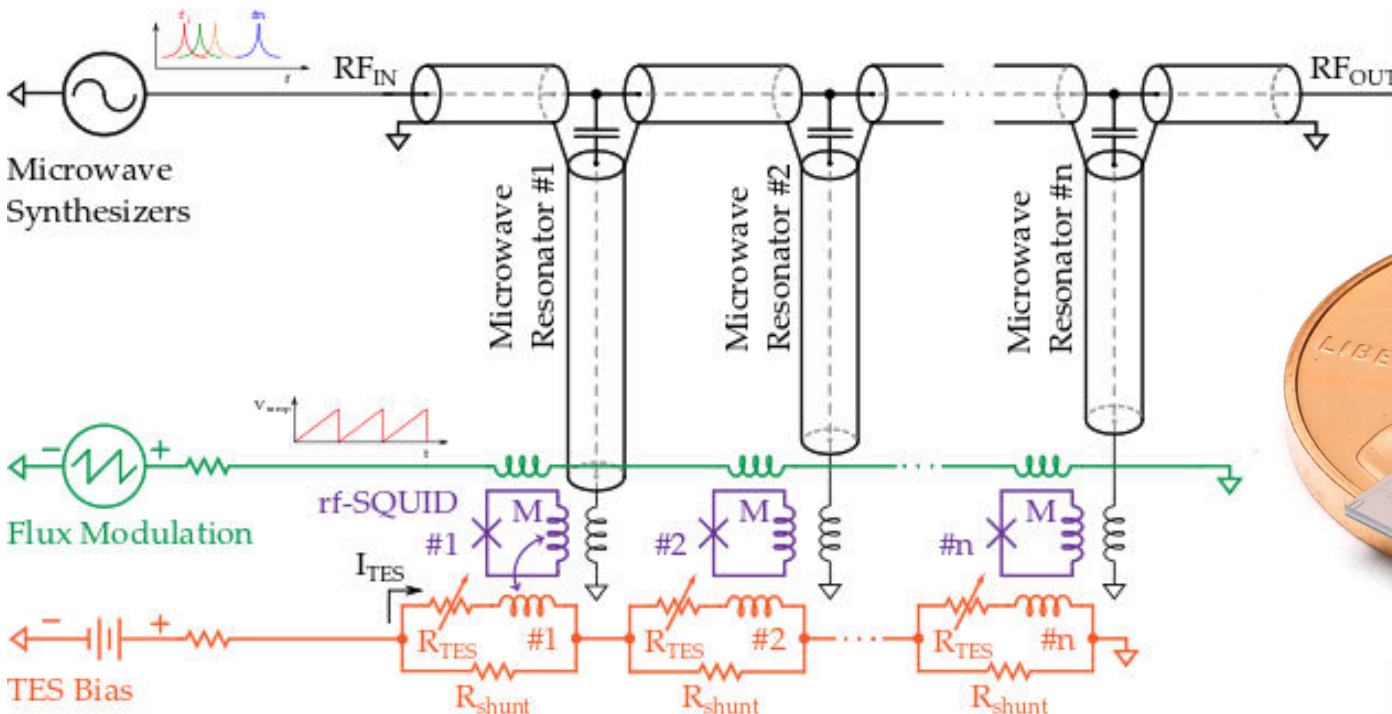
Come leggo la variazione di corrente nei TES?

↓
 μ MUX : serie di risonatori a quarto d'onda collegati a SQUID-RF

La formazione di un segnale

1) **Nell'assorbitore del TES viene rilasciata un'energia E**

$$E \rightarrow \delta T_{TES} \rightarrow \delta I_{TES}$$



Dimensioni di un μ MUX

Microwave SQUID Multiplexer (μ MUX)



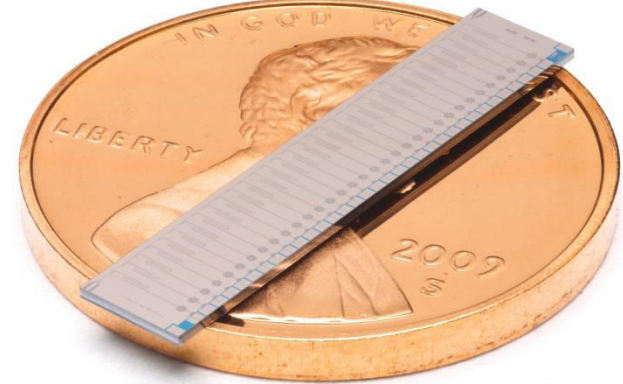
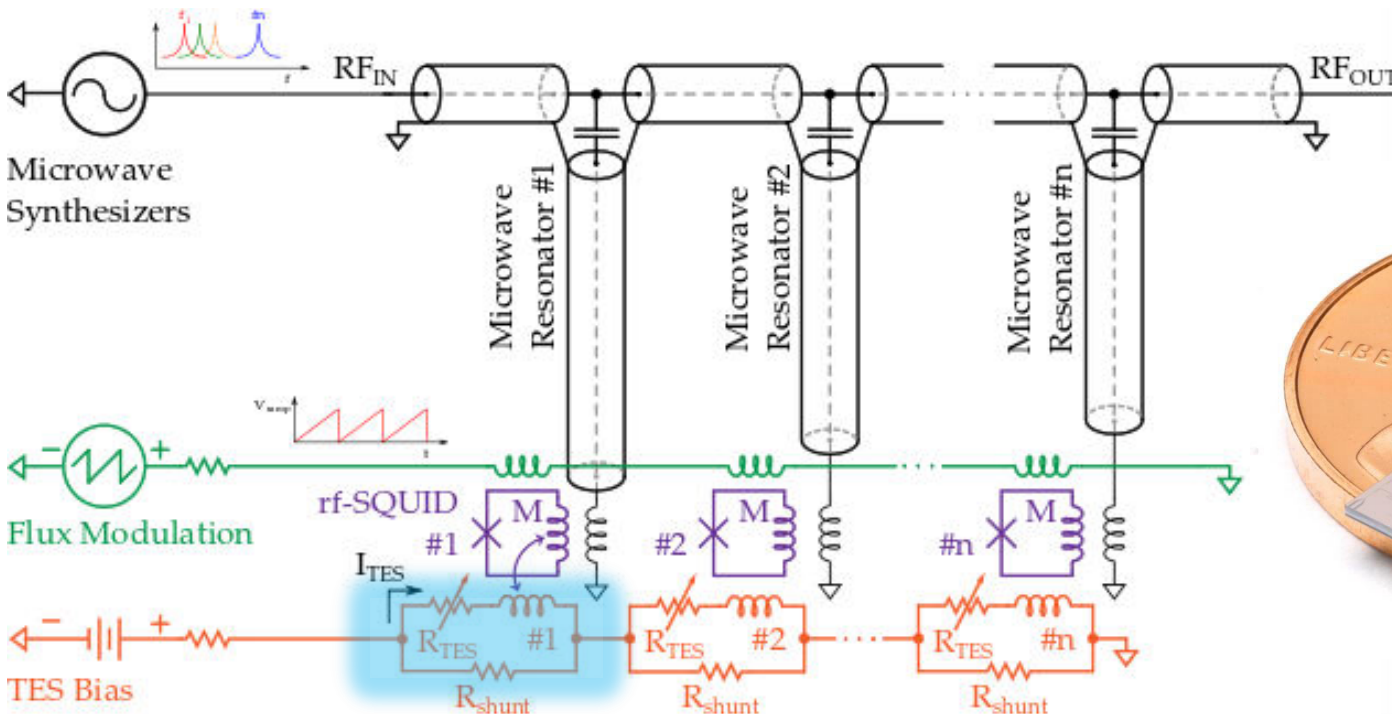
Come leggo la variazione di corrente nei TES?

↓
 μ MUX : serie di risonatori a quarto d'onda collegati a SQUID-RF

La formazione di un segnale

1) **Nell'assorbitore del TES viene rilasciata un'energia E**

$$E \rightarrow \delta T_{TES} \rightarrow \delta I_{TES}$$



Dimensioni di un μ MUX

Microwave SQUID Multiplexer (μ MUX)



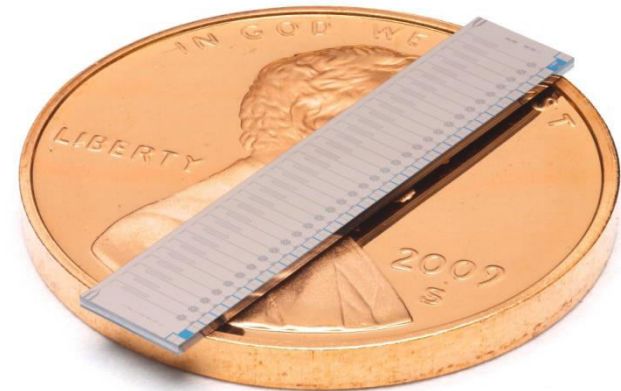
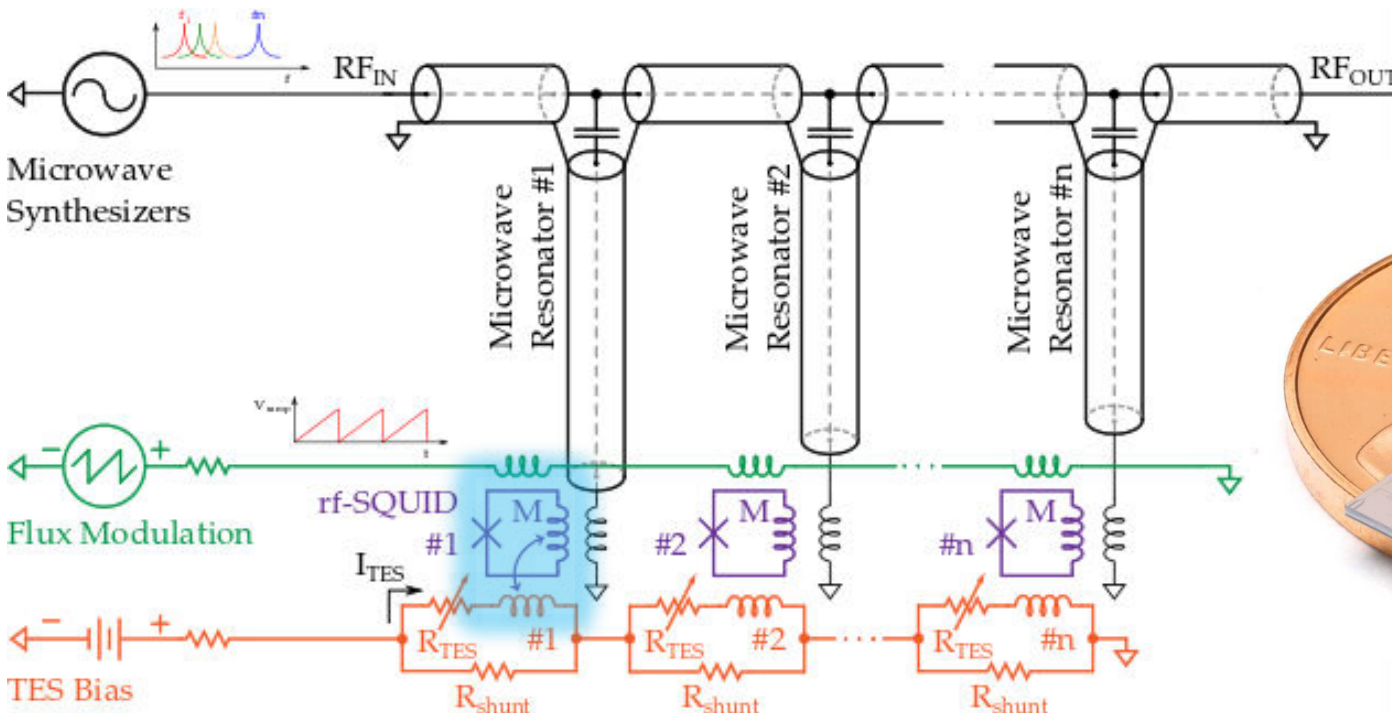
Come leggo la variazione di corrente nei TES?

↓
 μ MUX : serie di risonatori a quarto d'onda collegati a SQUID-RF

La formazione di un segnale

- 1) Nell'assorbitore del TES viene rilasciata un'energia E
- 2) Ogni TES è accoppiato a uno SQUID-RF
- 2.b) La risposta degli SQUID viene linearizzata da una rampa

$$E \rightarrow \delta T_{TES} \rightarrow \delta I_{TES} \rightarrow \delta \Phi_{squid}$$



Dimensioni di un μ MUX

Microwave SQUID Multiplexer (μ MUX)



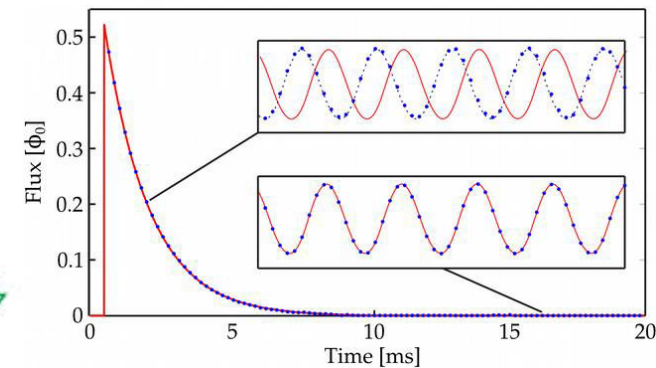
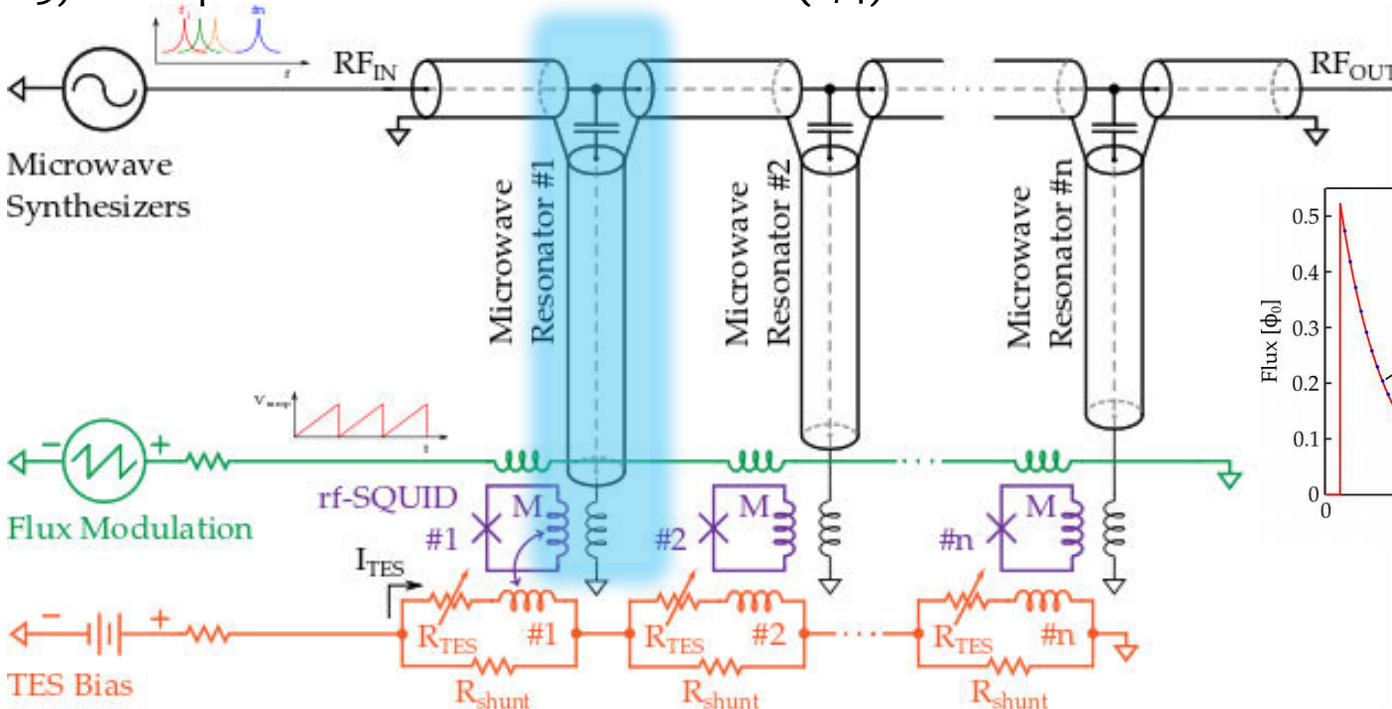
Come leggo la variazione di corrente nei TES?

↓
 μ MUX : serie di risonatori a quarto d'onda collegati a SQUID-RF

La formazione di un segnale

- 1) Nell'assorbitore del TES viene rilasciata un'energia E
- 2) Ogni TES è accoppiato a uno SQUID-RF
- 2.b) La risposta degli SQUID viene linearizzata da una rampa
- 3) La frequenza di risonanza dei risonatori ($\lambda/4$) cambia

$$E \rightarrow \delta T_{TES} \rightarrow \delta I_{TES} \rightarrow \delta \Phi_{squid} \rightarrow \delta f_{risonatore}$$



Segnale misurato

ROACH2

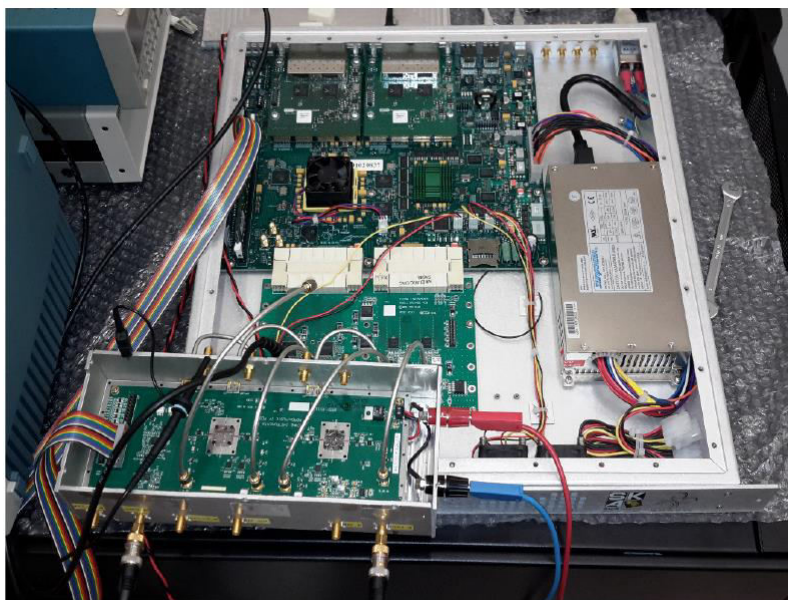
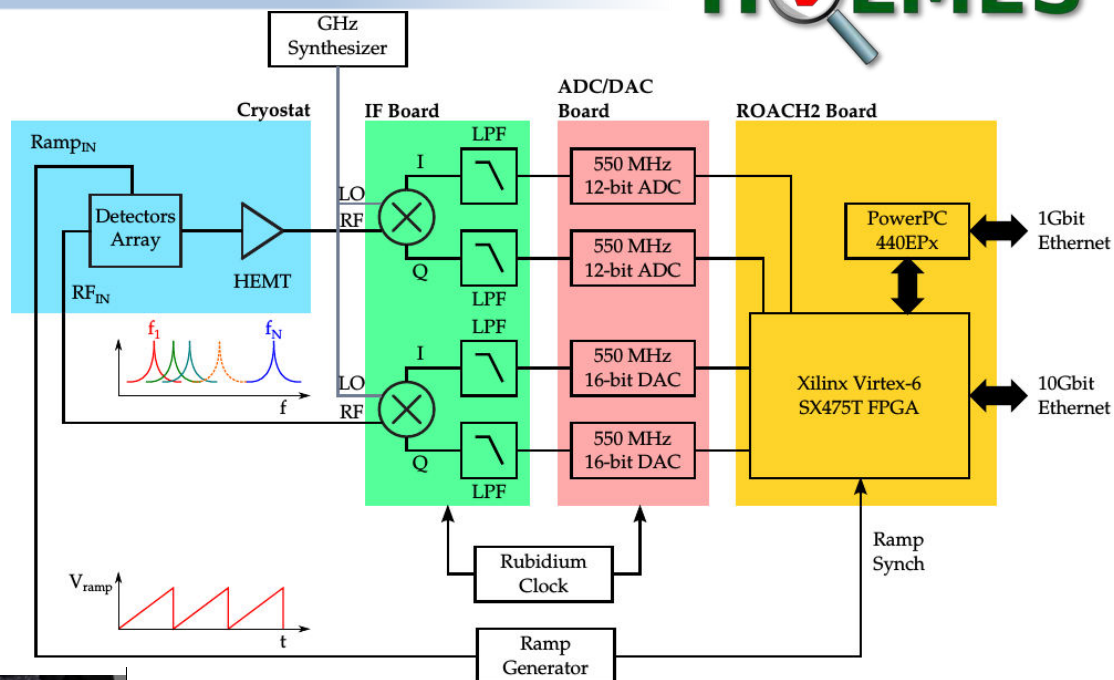
- Dati processati da *FPGA* (*Virtex6* di *Xilinx*)
- Larghezza di banda disponibile 550 MHz

➤ ROACH2 (tempo-reale)

- ricostruzione impulsi
- selezione eventi oltre una soglia

➤ Server (circa tempo reale)

- analisi OF + identificazione pileup

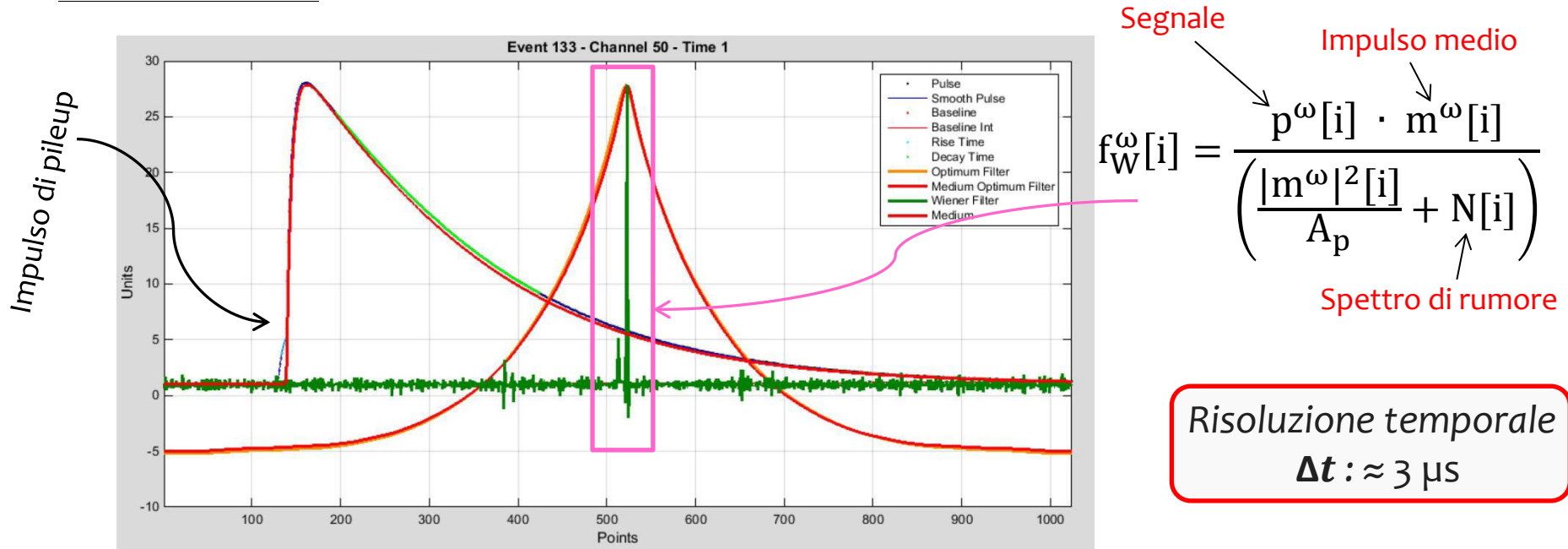


Specifiche HOLMES finali:

- 1 ROACH2 ogni 32 TES
- Rampa a 500 kHz
- Segnali con un $RT_{10-90} = 20\mu s$
- ≈ 150 TB in 3 anni

➤ Risultati ottenuti con simulazioni su segnali compatibili a quelli finali di Holmes (RT di 20μs)

- Filtro di Wiener



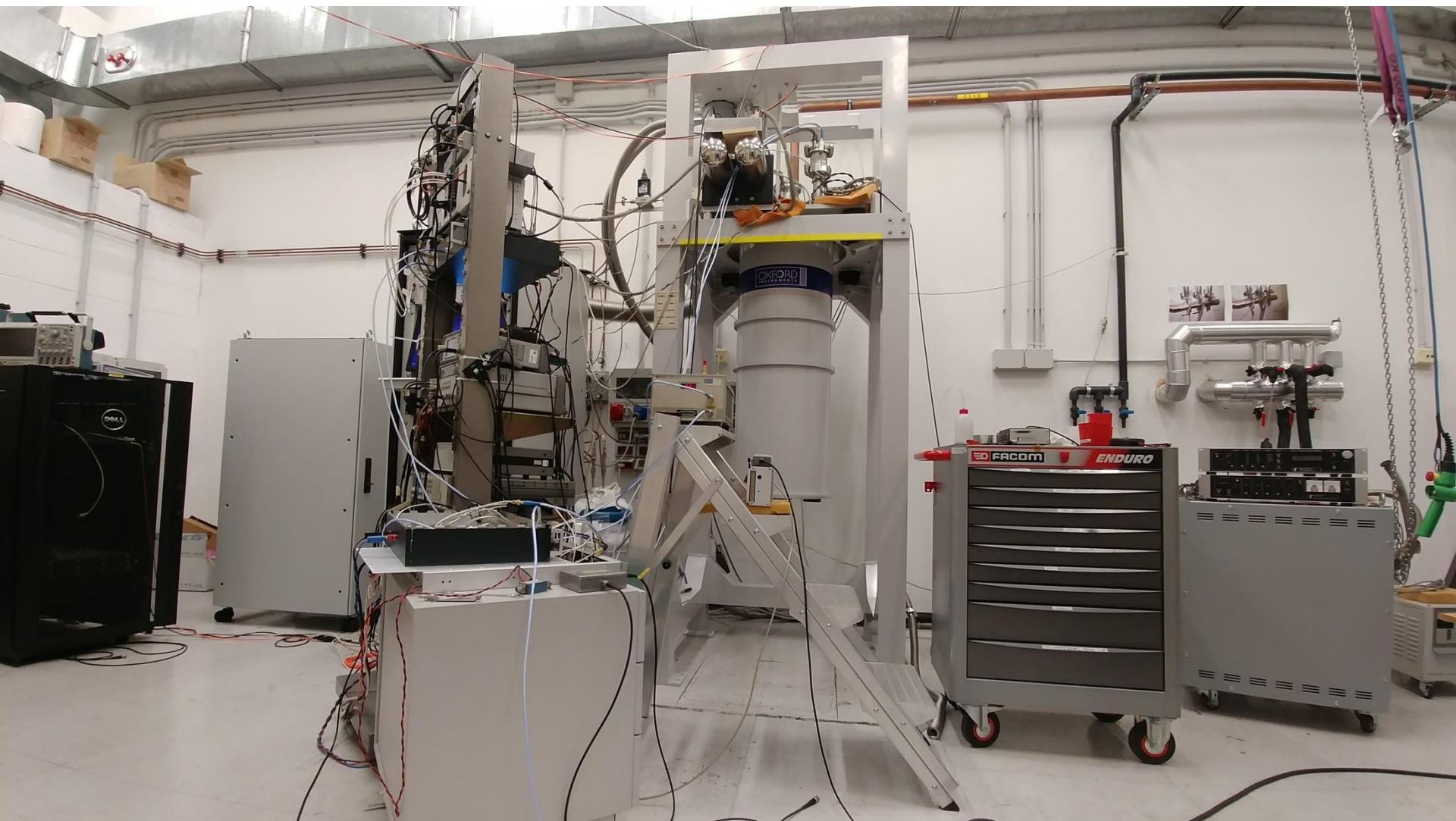
- Singular Values Decomposition (SVD) [ancora in fase di sviluppo]

- Idea:
- 1) Prendere un campione di impulsi in cui quelli singoli siano $\gg$ di quelli di pileup
 - 2) SVD sulla matrice dei segnali per trovare le *Principal Component* più importanti
 - 3) Costruire una base per gli impulsi singoli
 - 4) Usare la base ottenuta per discriminare gli impulsi di pileup

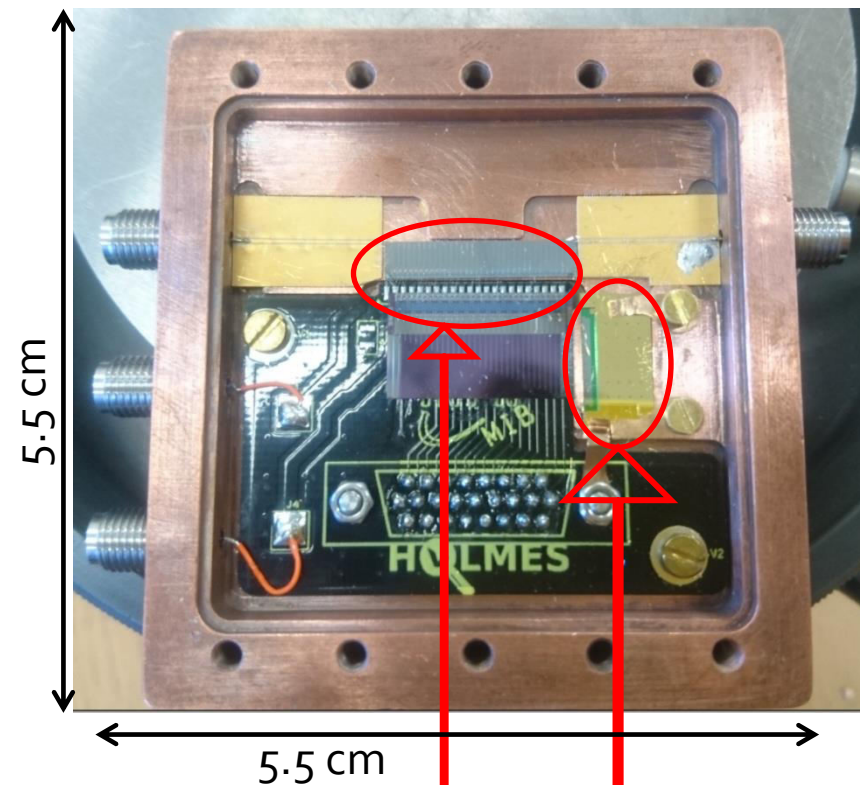
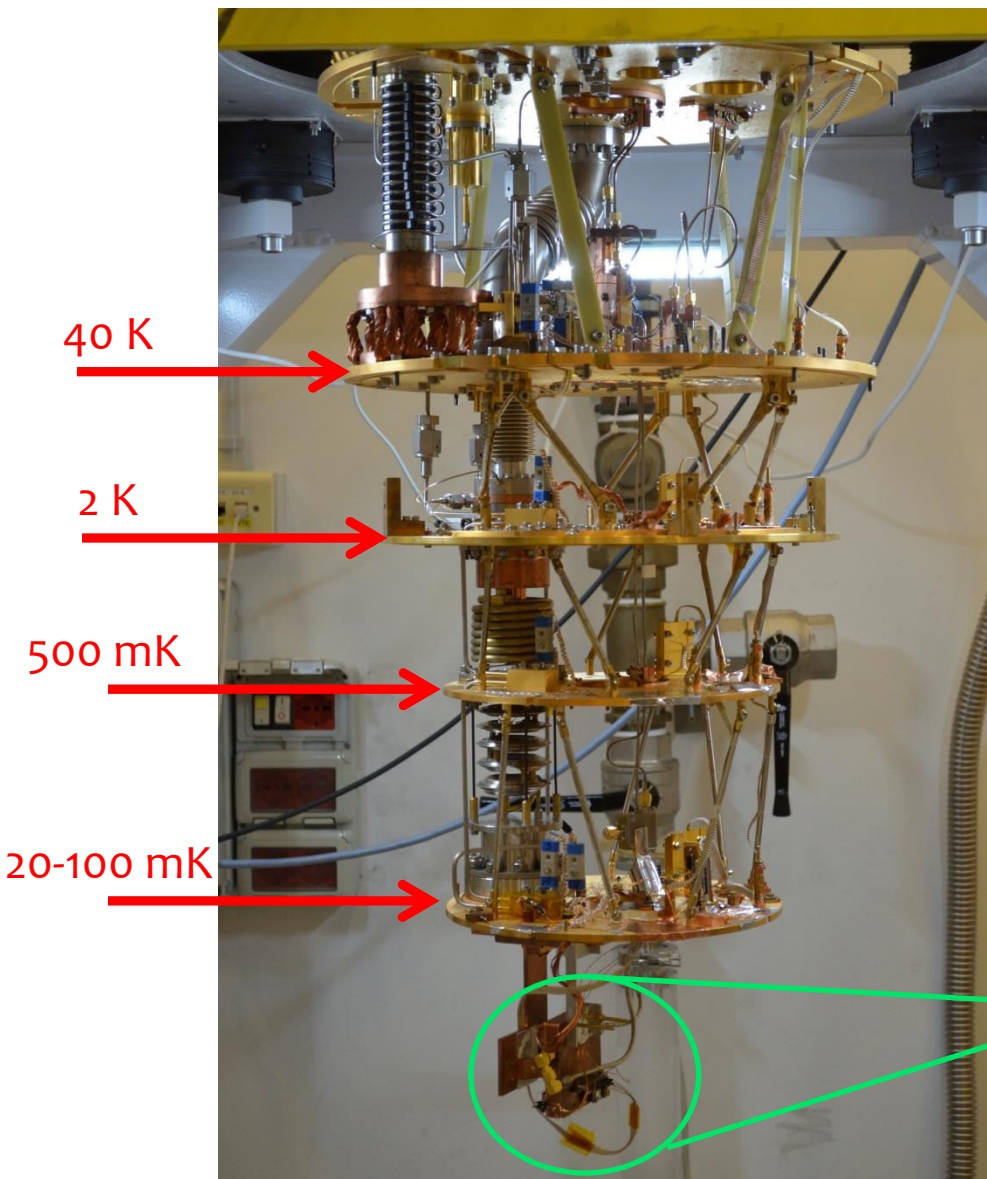


Risoluzione temporale
 $\Delta t : \approx 1.5 \mu s$

Test attuali e prospettive

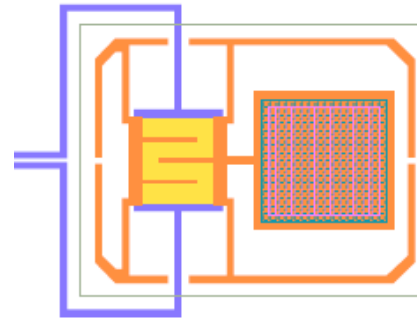
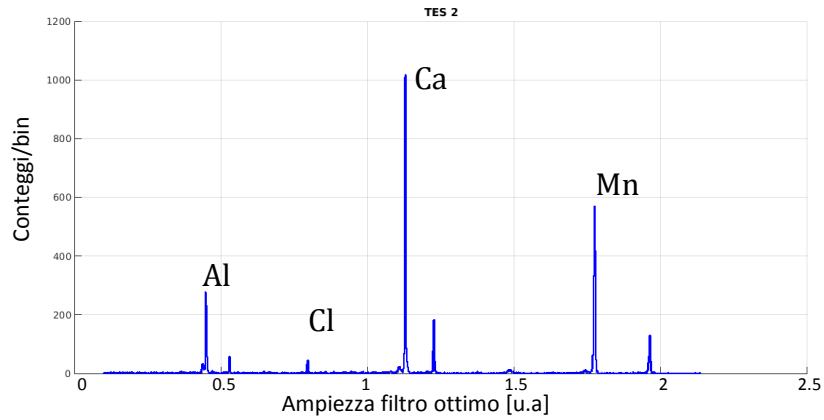


Set-up criogenico per test preliminari

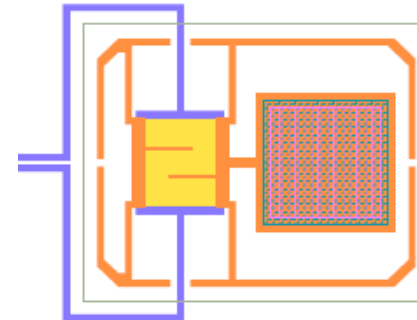
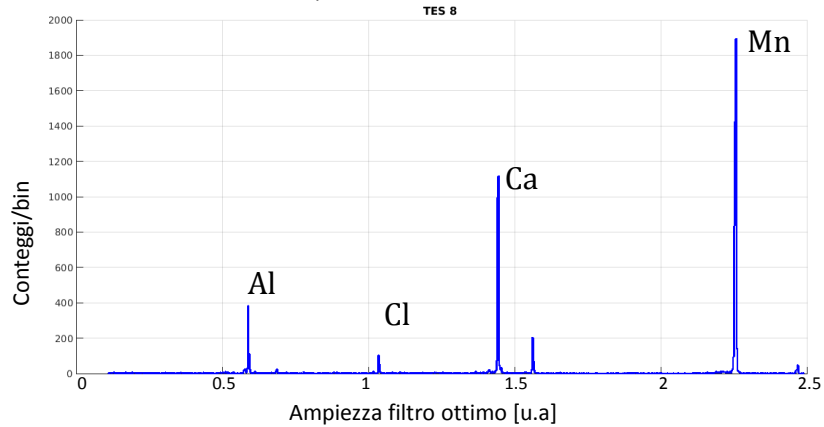


- TES (array 4x6)
- μ MUX
- Sorgente di Fe
 ↳ Al, Cl, Ca

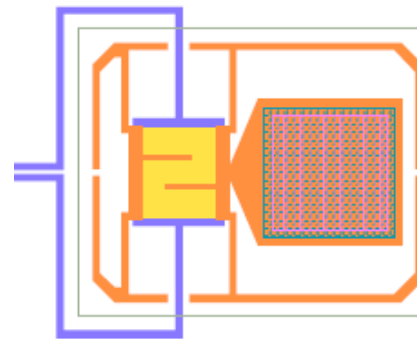
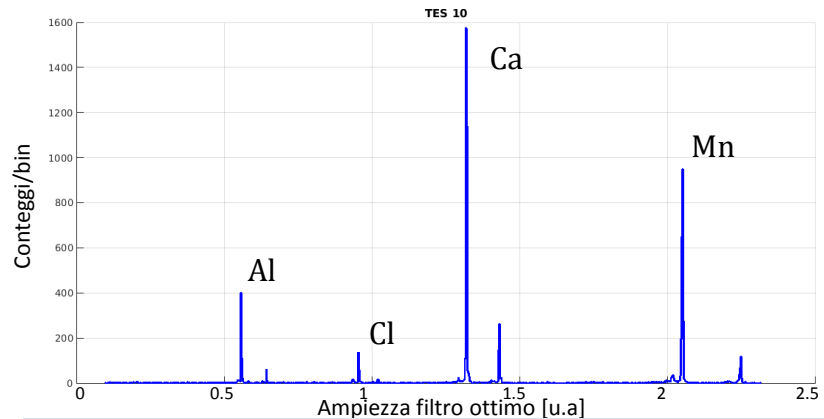
Le diverse risposte dei TES



TES 2

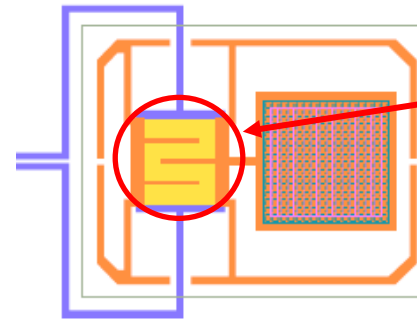
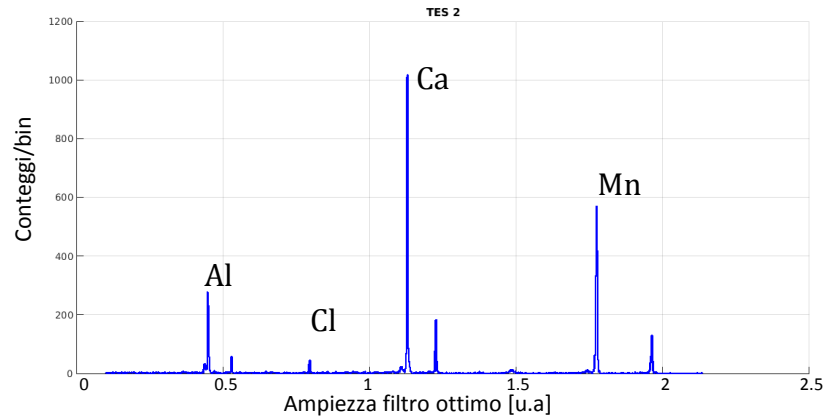


TES 8



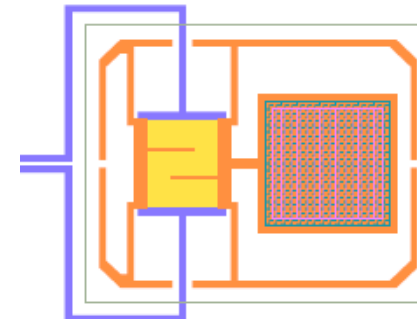
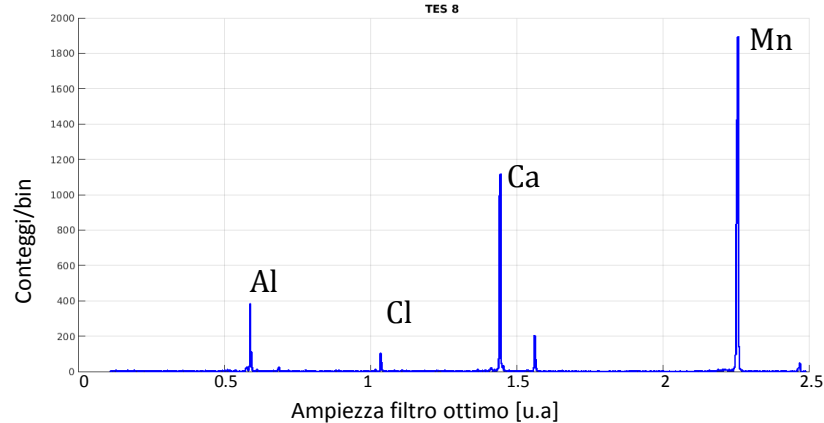
TES 10

Le diverse risposte dei TES



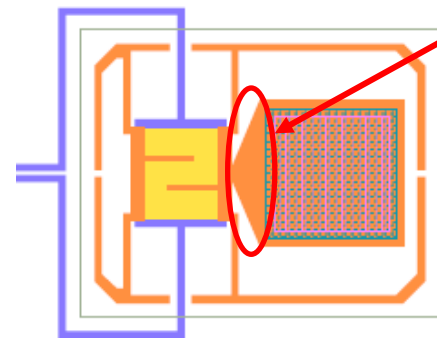
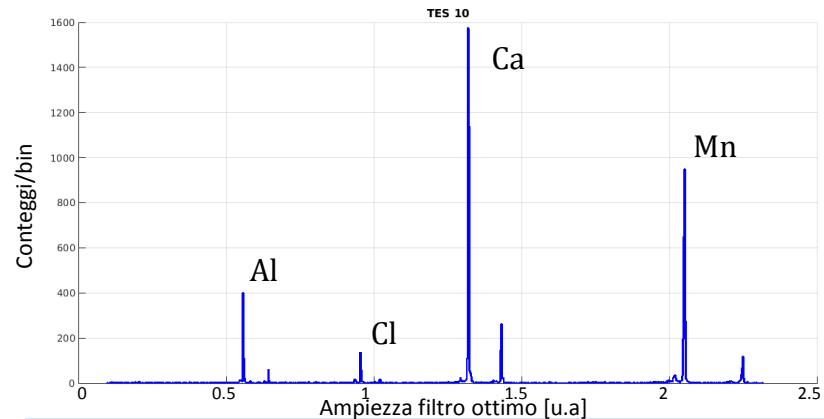
Superconduttore con
geometria a tre barre

TES 2



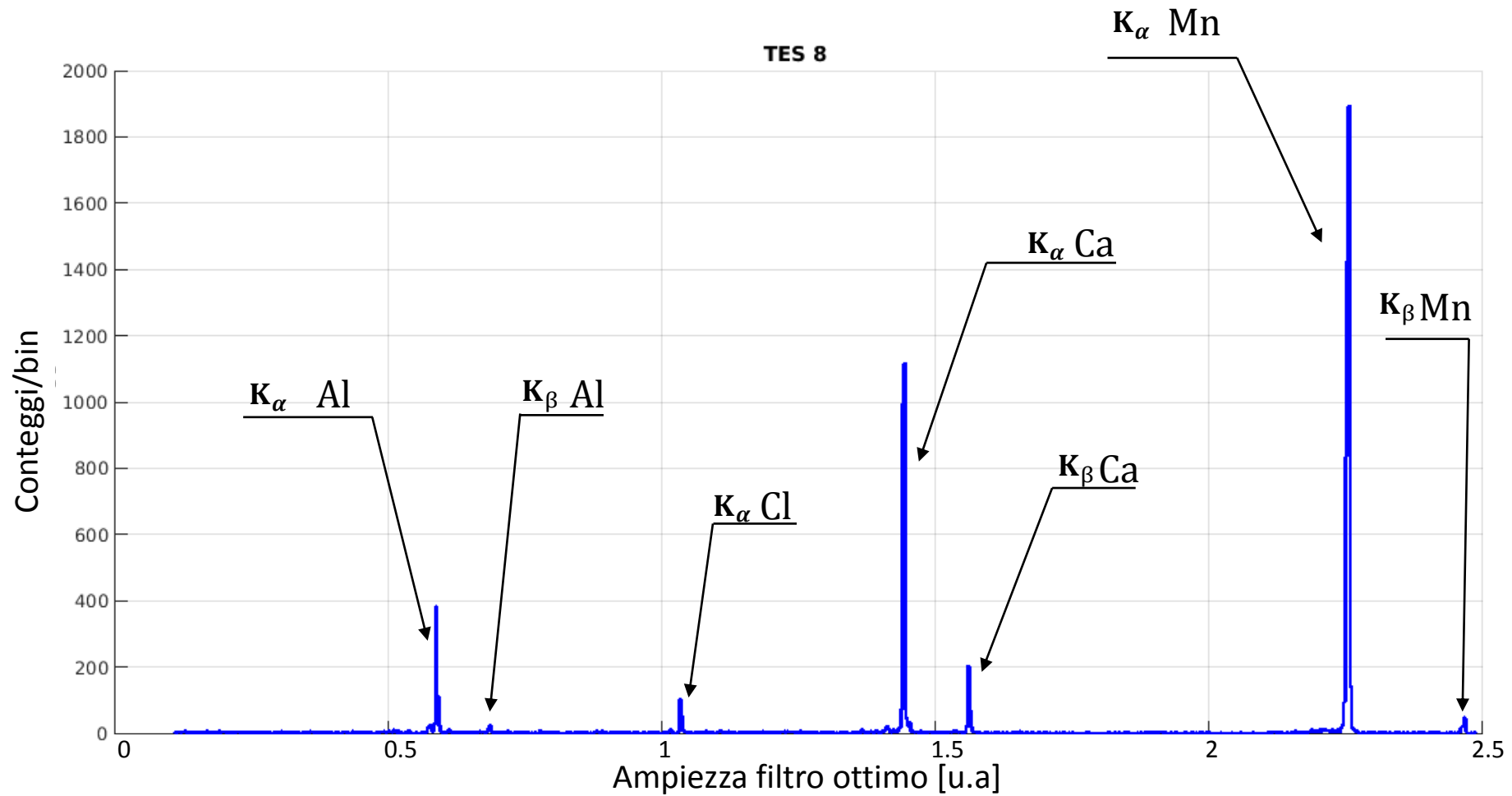
TES 8

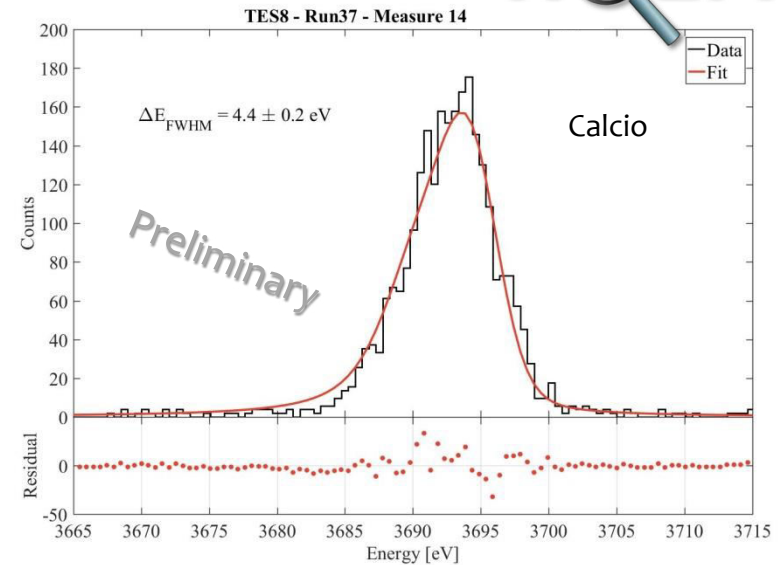
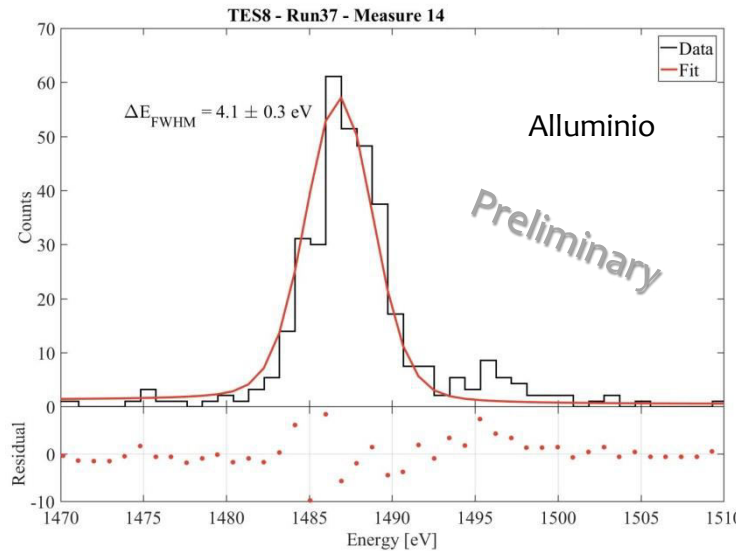
Baseline Holmes



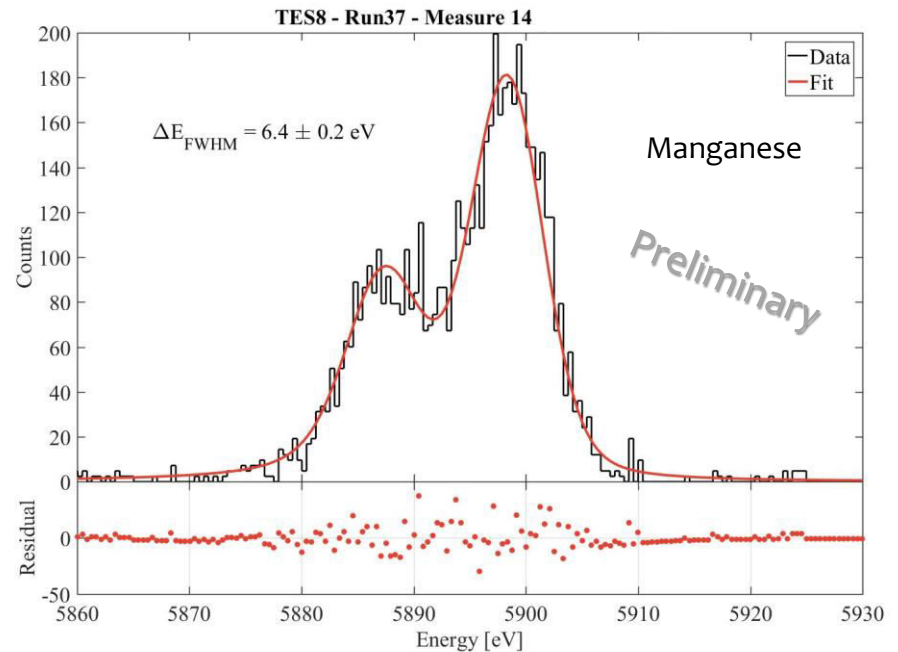
Capacità assorbitore maggiore
rispetto agli altri 2 TES

TES 10

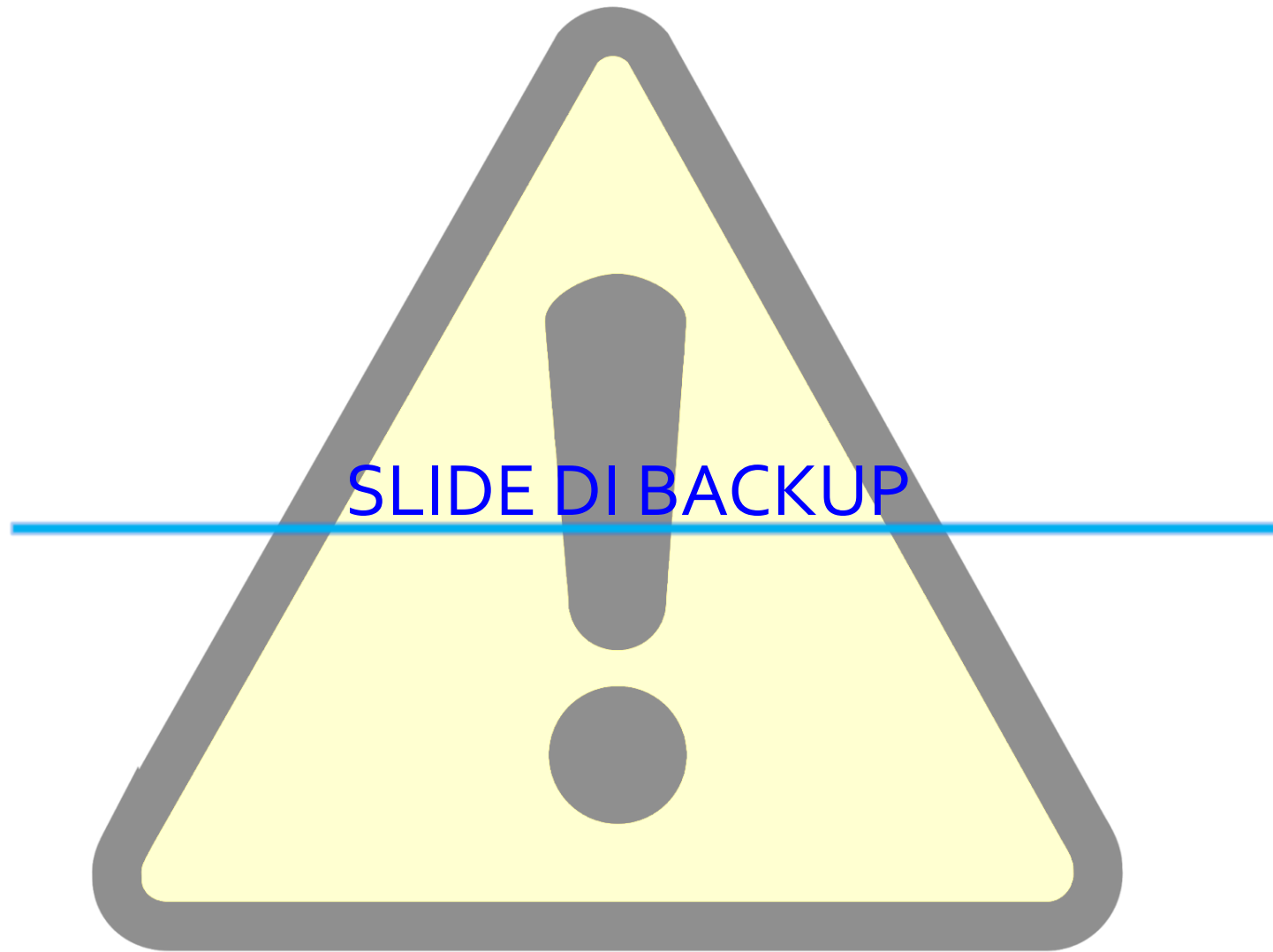




- Risoluzione entro le richieste di HOLMES
- Aumentare tempo della misura



- Fine 2017
 - separazione chimica sorgente di ^{163}Ho da ^{162}Er irraggiato con n
 - fabbricazione dell'array di TES Holmes-like al NIST
- 2018
 - Ottimizzazione processo di impiantazione ^{163}Ho nell'assorbitore dei TES
- Fine 2018
 - inizio misure con primo sub-array 16×4 di TES impiantati con ^{163}Ho
- 2019
 - Completamento array di 1024 TES di Holmes



Produzione Olmio e impiantazione



Tm 163 1.81 h ϵ β^+ ... γ 104; 69; 241; 1434; 1397...	Tm 164 5.1 m 2.0 m ϵ β^+ 2.9... γ 91; 1155; 315; 769...	Tm 165 30.06 h ϵ β^+ ... γ 243; 47; 297; 807...	Tm 166 7.70 h ϵ β^+ 1.9... γ 779; 2052; 184; 1274...	Tm 167 9.25 d ϵ β^+ 532... m	Tm 168 93.1 d ϵ β^+ ... β^- ... γ 198; 816; 447...
Er 162 0.139 α 19 $\sigma_{n,\alpha} < 0.011$	Er 163 75 m ϵ β^+ ... γ (1114...) g	Er 164 1.601 α 13 $\sigma_{n,\alpha} < 0.0012$	Er 165 10.3 h ϵ no γ	Er 166 33.503 α 3 + 14 $\sigma_{n,\alpha} < 7E-5$	Er 167 2.3 s 22.869 β^- 208 $\sigma_{n,\alpha} < 3E-6$
Ho 161 6.7 s 2.5 h ϵ β^- ... γ 26; 78... β^- 211	Ho 162 68 m 15 m ϵ β^+ 1.1... β^- ... 1220; 283; 937...	Ho 163 1.1 4570 a ϵ β^+ ... γ 268	Ho 164 37 m 29 m ϵ β^+ 1.0... β^- ... 57; 91; 73...	Ho 165 100 α 3.1 + 58 $\sigma_{n,\alpha} < 2E-5$	Ho 166 1200 a 26.80 h ϵ 0.07... β^- ... γ 184; 810; 712 β^- 3100 $\sigma_{n,\alpha} < 2E-5$
Dy 160 2.329 α 60 $\sigma_{n,\alpha} < 0.0003$	Dy 161 18.889 α 600 $\sigma_{n,\alpha} < 1E-6$	Dy 162 25.475 α 170	Dy 163 24.896 α 120 $\sigma_{n,\alpha} < 2E-5$	Dy 164 28.260 α 1610 + 1040	Dy 165 1.3 m 2.35 h ϵ β^- ... β^- 0.9; 1.3... 1.0... γ 515... 2000 (362...) σ 2000 σ 3500

≈ 4 mm FWHM
beam size

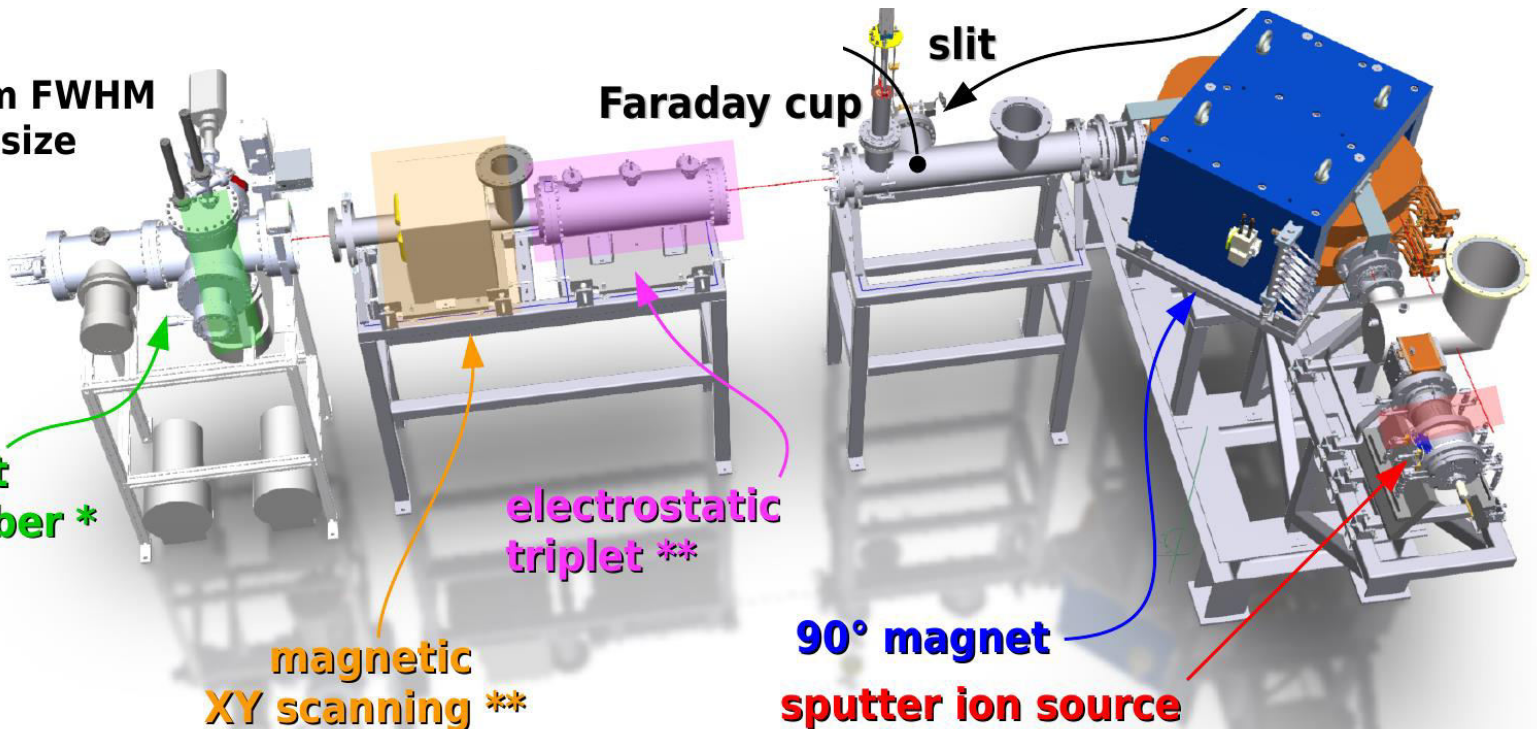
target
chamber *

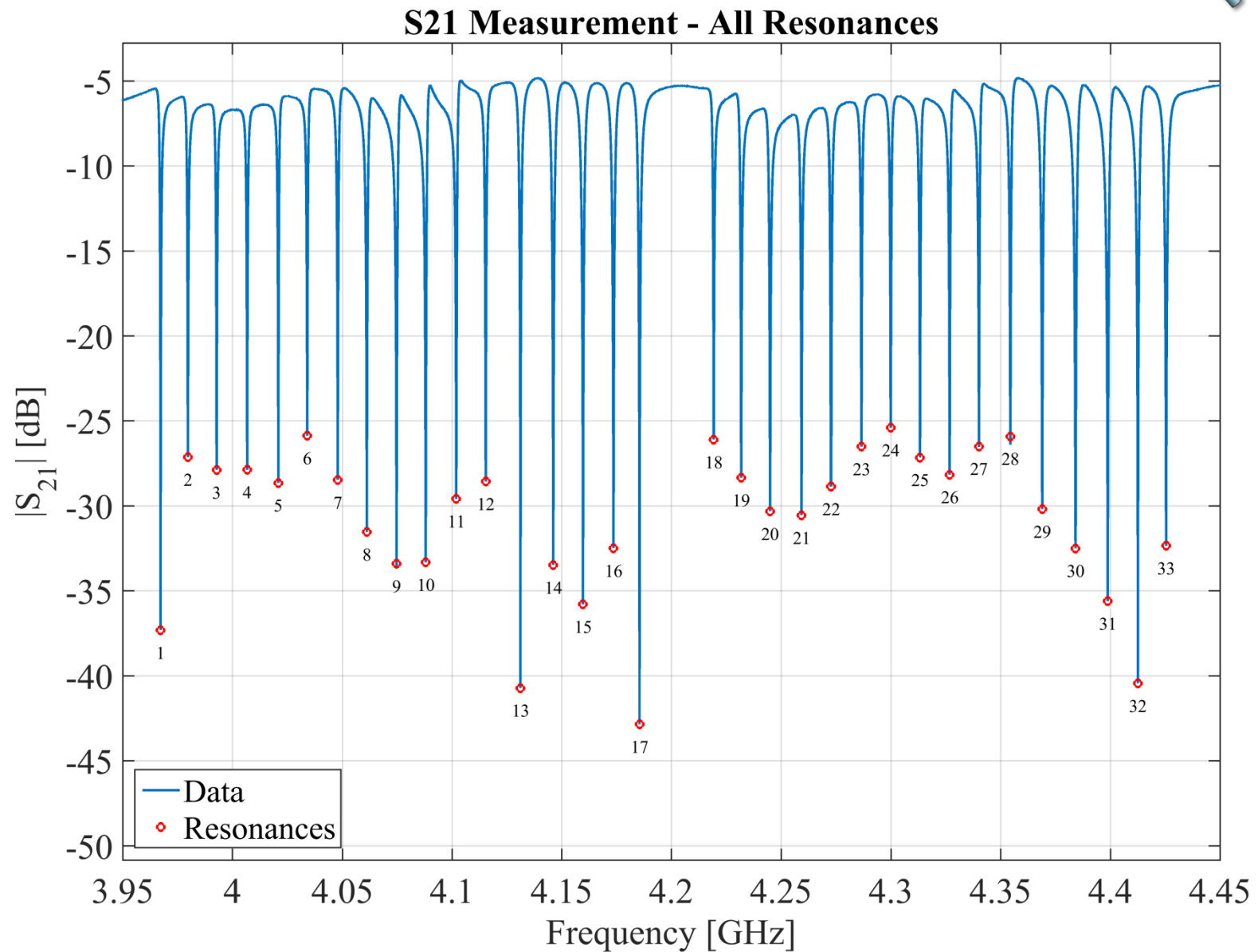
Faraday cup

electrostatic
triplet **

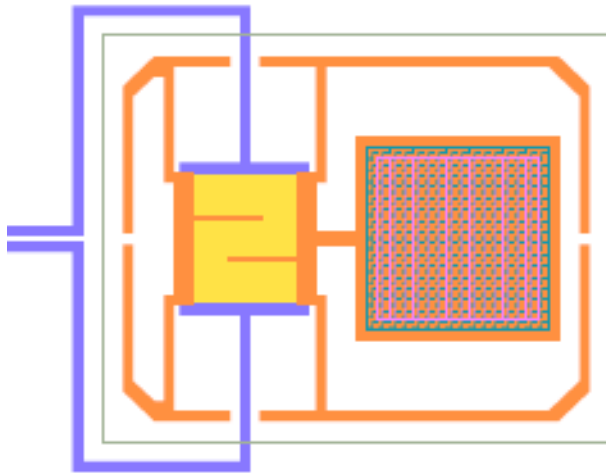
magnetic
XY scanning **

90° magnet
sputter ion source





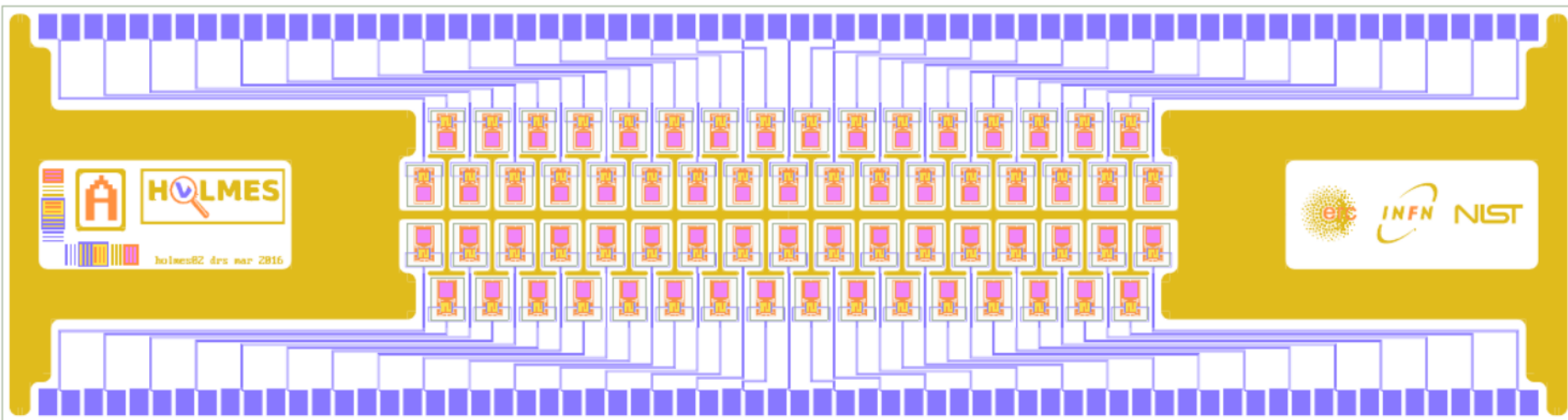
Si
 SiO₂
 Si_xN_y
 Mo
 Cu
 Bi
 Au
 Ho



TES + assorbitore dall'alto

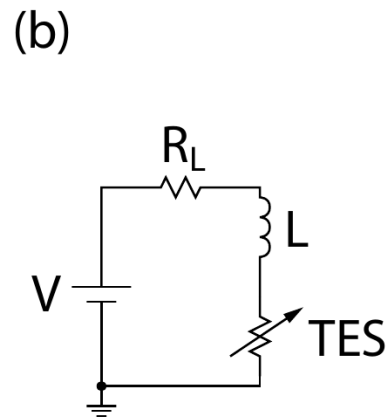
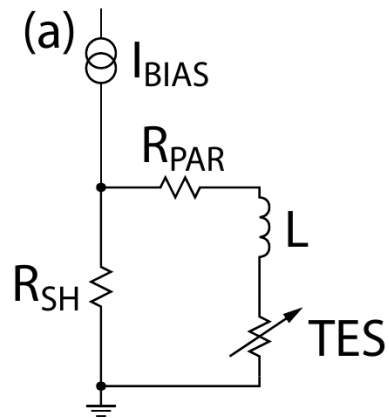


TES + assorbitore di lato



Prototipo array finale di 64 rivelatori

Segnale in un TES



$$\beta_I = \frac{I_0}{R_0} \frac{\partial R}{\partial I} \Big|_{T_0}$$

$$\alpha_I = \frac{T_0}{R_0} \frac{\partial R}{\partial T} \Big|_{I_0}$$

