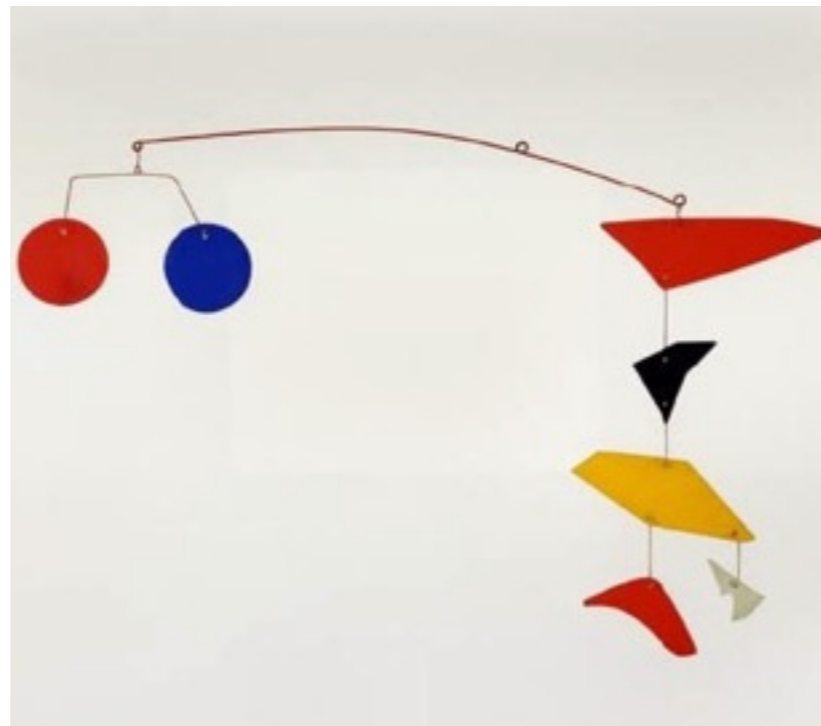




European
Research
Council



CALDER: lettori di luce criogenici ad alta sensibilità

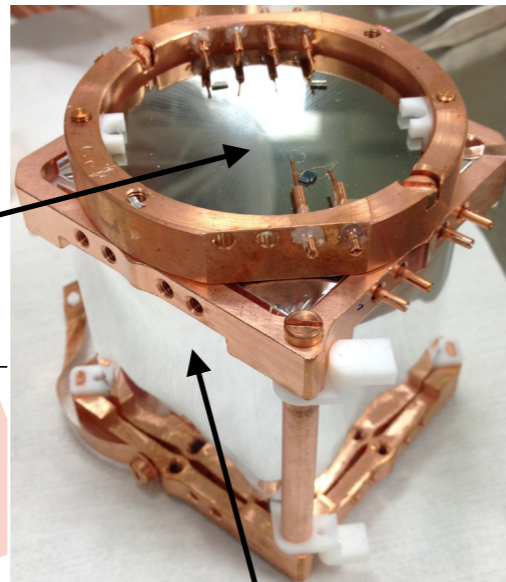


Nicola Casali - IFAE2016, Genova 30/03/16 - 1/04/16

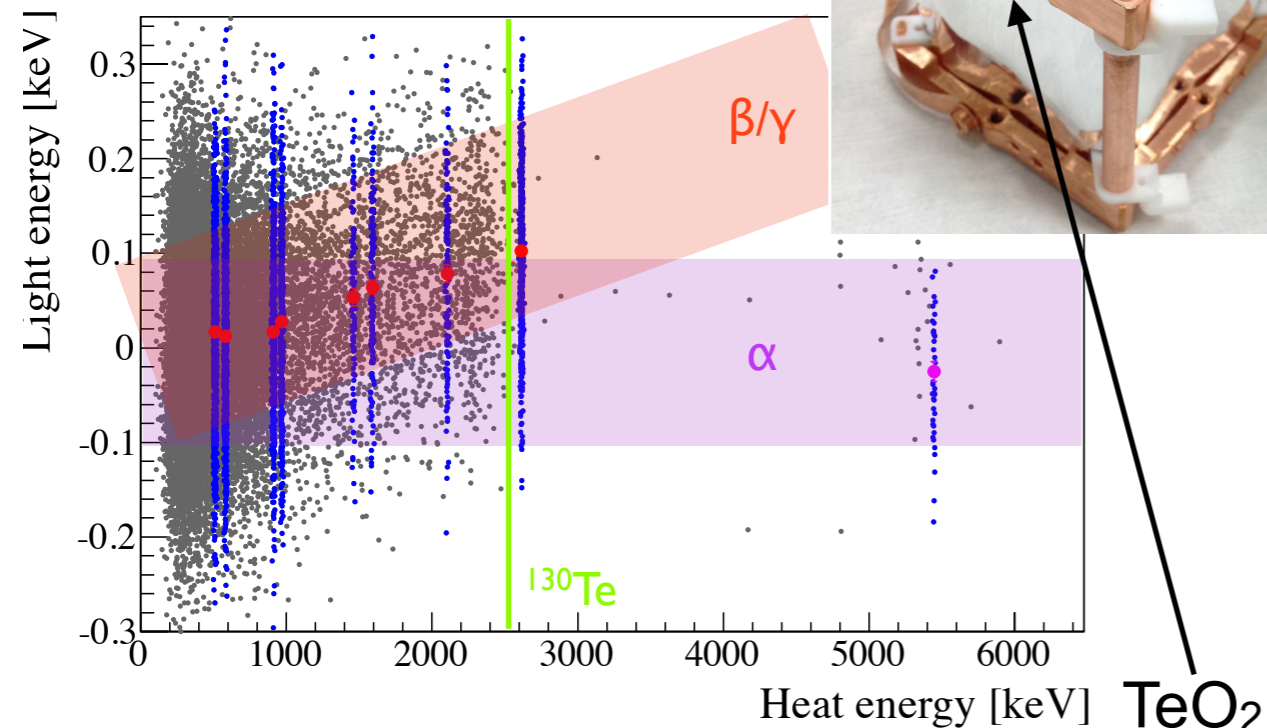
Perché lettori di luce ad alta sensibilità

- La prossima generazione di esperimenti per la ricerca di eventi rari vuole aumentare la sensibilità aumentando la sue capacità di reiezione del fondo:
Decadimento doppio beta senza neutrini e/o interazioni di materia oscura.

Rivelazione della luce Cherenkov per un futuro upgrade di CUORE



Lettore di luce



N. Casali et. al, Eur.Phys.J. C 75 (2015) 1, 12

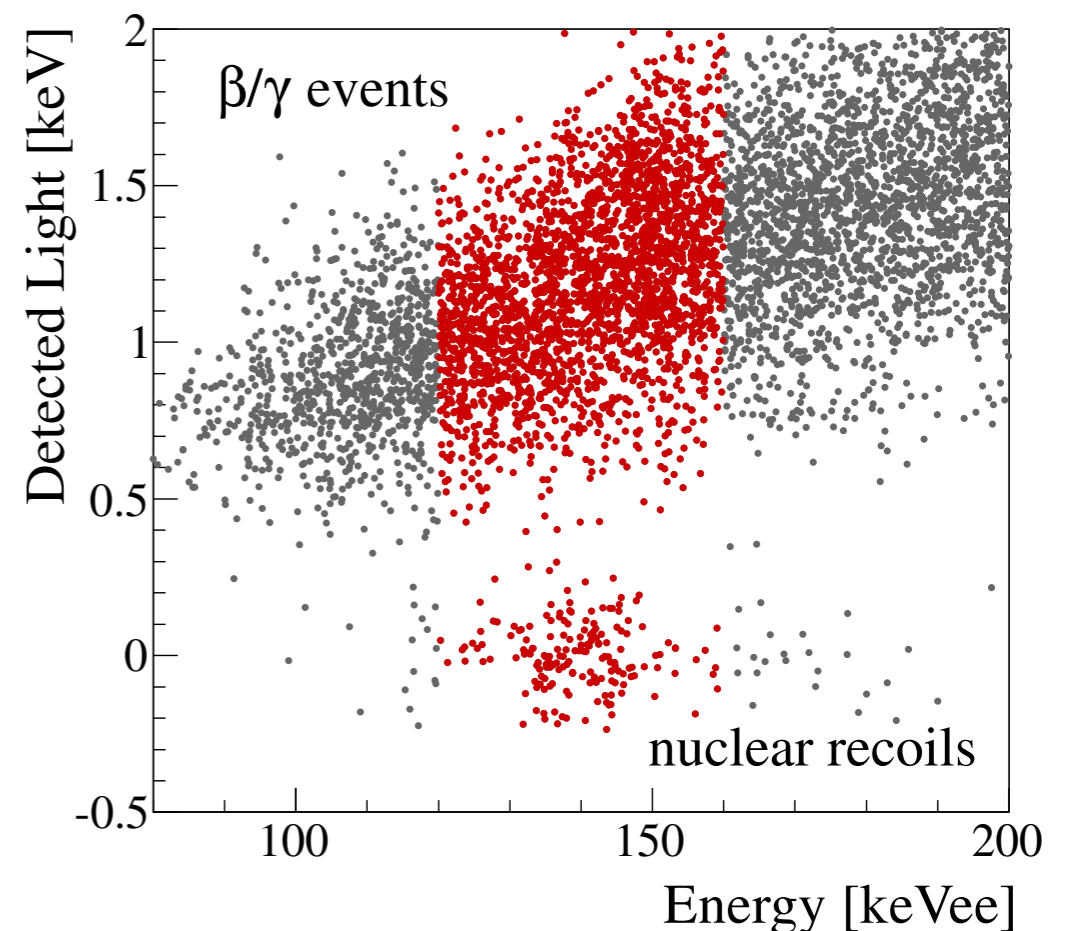
- L'esperimento CUORE ricerca il decadimento doppio beta del ^{130}Te usando dei bolometri di TeO_2 .
- Il segnale atteso sono due elettroni con un'energia cinetica totale di ~ 2.5 MeV.
- Il fondo dominante è costituito da particelle α .
- Queste possono essere rimosse rivelando **la luce Cherenkov** emessa solamente dalle interazioni β/γ (le uniche sopra soglia).

Perché lettori di luce ad alta sensibilità

- La prossima generazione di esperimenti per la ricerca di eventi rari vuole aumentare la sensibilità aumentando la sue capacità di reiezione del fondo:
Decadimento doppio beta senza neutrini e/o interazioni di materia oscura.

- I bolometri scintillanti di ZnSe oltre che essere utilizzati nella ricerca del decadimento doppio beta del ^{82}Se (LUCIFER/CUPIDO), possono essere utilizzati per rivelare l'interazione della materia oscura.
- A basse energie (~ 10 keV) occorre un'elevata sensibilità per discriminare le interazioni β/γ dai rinculi nucleari prodotti dalla materia oscura.
- Studiare **simultaneamente** doppio decadimento beta senza neutrini e interazioni di materia oscura

Interazioni di materia oscura in bolometri scintillanti di ZnSe



J.W. Beeman et al., JINST 8, P05021 (2013)

Requisiti necessari

I rivelatori di luce per la prossima generazione di esperimenti bolometrici devono soddisfare i seguenti requisiti:

- Risoluzione energetica < 20 eV
- Area efficace di ~ 25 cm²
- Facilmente scalabili e riproducibili (~ 1000 rivelatori)
- Elevati standard di radio-purezza dei materiali
- Esteso intervallo di funzionamento (5 - 30 mK)

Molti gruppi interessati a dimostrare le potenzialità delle proprie tecnologie...

1) L.Pattavina et al., *Journal of Low Temp Phys* 1-6 (2015) -> **Ge Naganov-Luke with NTD**

2) M. Biassoni et al., *Eur.Phys.J. C* 75 (2015) 10, 480 -> **Si Naganov-Luke with NTD**

3) K.Schaeffner et. al, *Astropart.Phys.* 69 (2015) 30-36 -> **W-TES on SOS**

4) M. Willers et al., *JINST* 10 P03003 (2015) -> **Si Naganov-Luke + TES**

5) **CALDER -> KID -> QUESTO TALK**

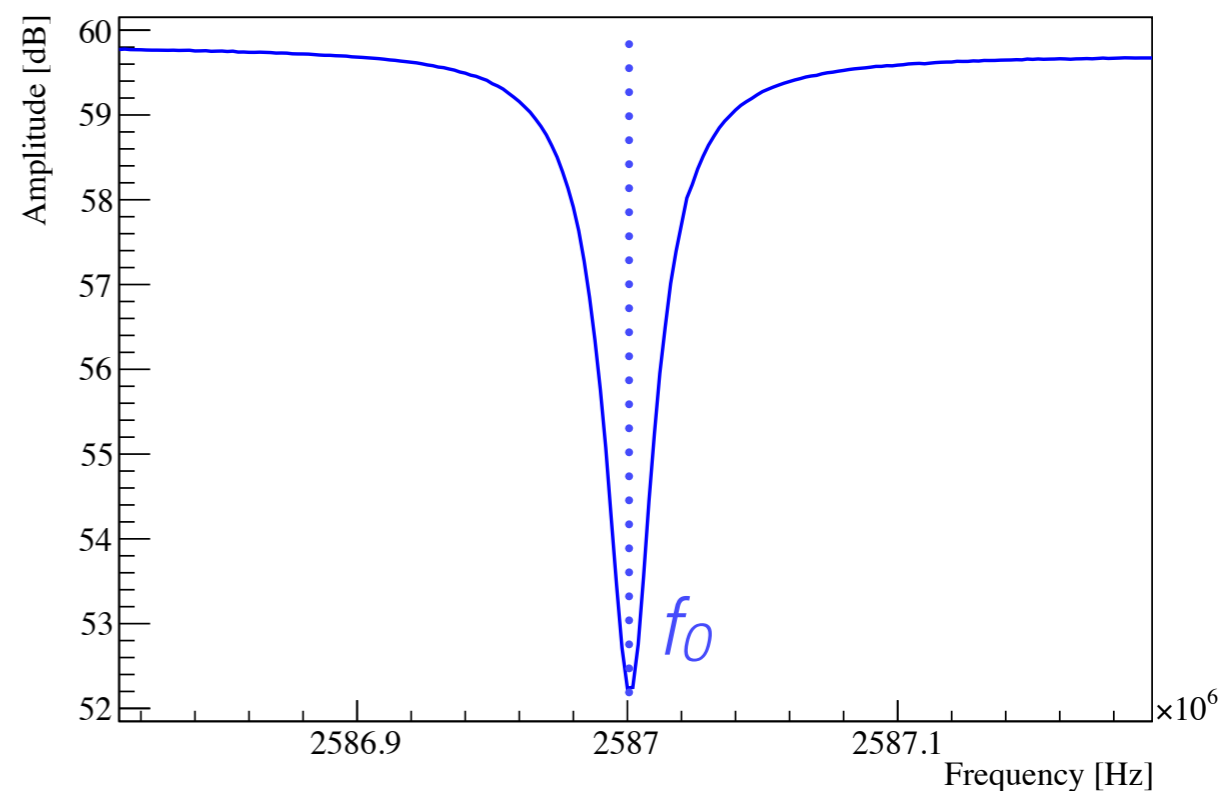
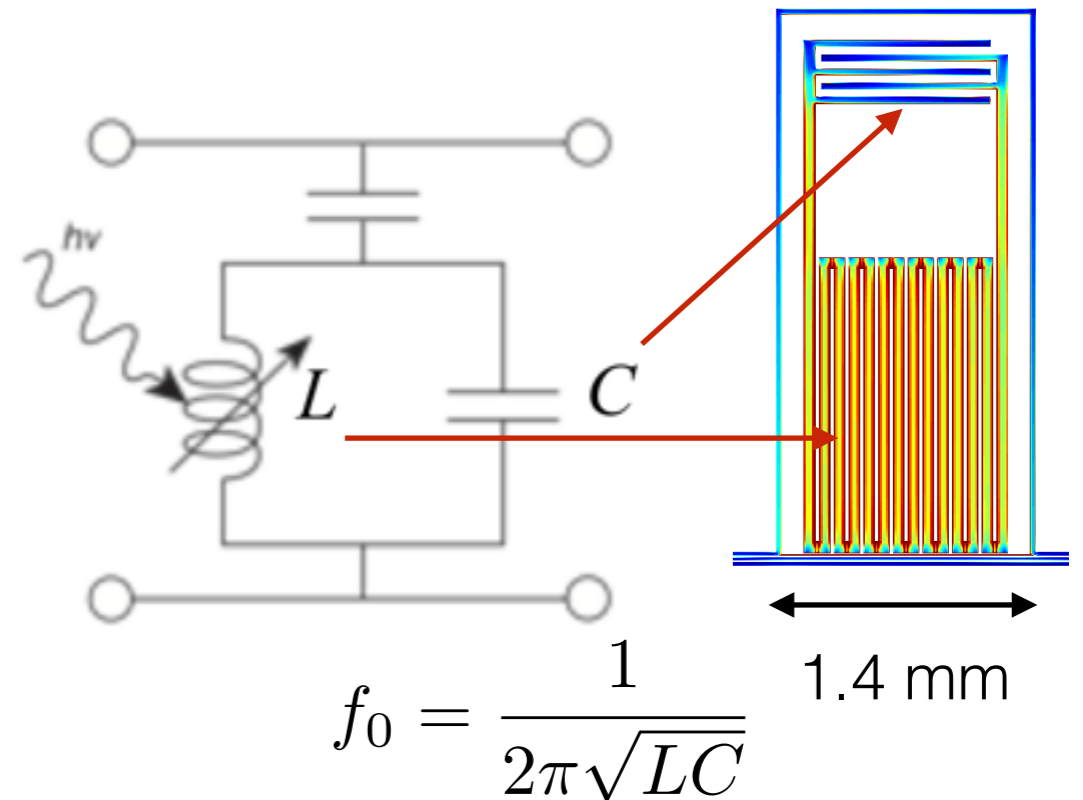
Ma nessuno ancora soddisfa (o ha dimostrato di soddisfare) tutti i requisiti necessari

KID (Kinetic Inductance Detector)

- In un superconduttore R è ~ 0 se $I = DC$
- Se $I = AC$ con $\omega \sim GHz$ l'energia cinetica immagazzinata delle coppie di Cooper genera un ritardo tra I applicata e quella che circola nel superconduttore \rightarrow si genera una induttanza (L) detta appunto induttanza cinetica.

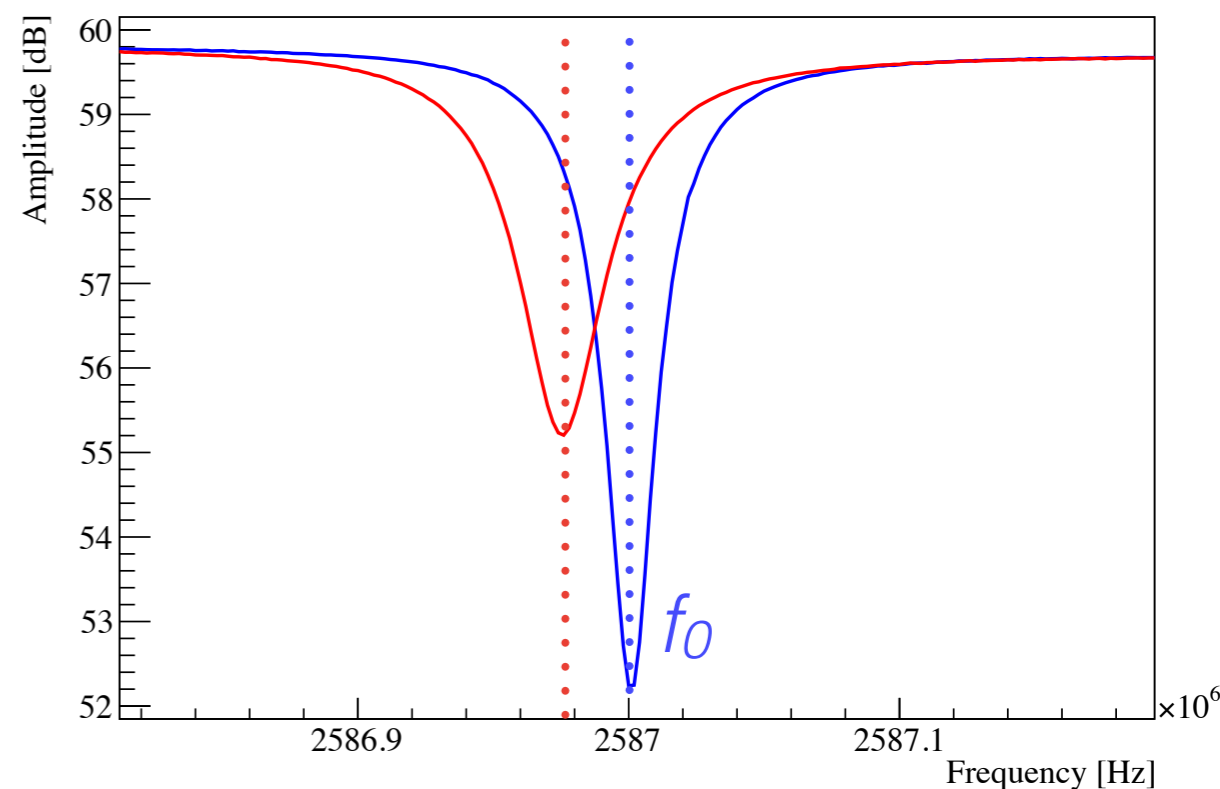
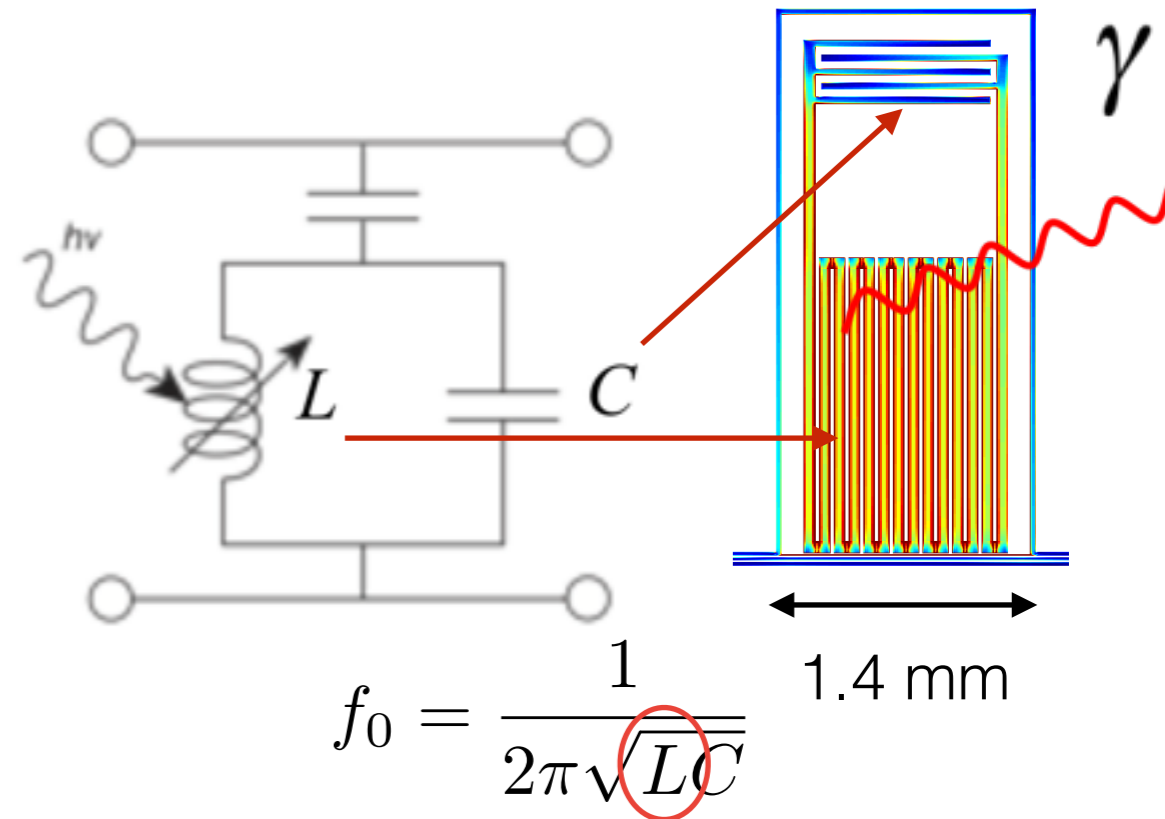
KID (Kinetic Inductance Detector)

- In un superconduttore R è ~ 0 se $I = DC$
- Se $I = AC$ con $\omega \sim GHz$ l'energia cinetica immagazzinata delle coppie di Cooper genera un ritardo tra I applicata e quella che circola nel superconduttore \rightarrow si genera una induttanza (L) detta appunto induttanza cinetica.
- Accoppiando una capacità (C) si realizza un circuito LC che risuona ad una determinata frequenza f_0



KID (Kinetic Inductance Detector)

- In un superconduttore R è ~ 0 se $I = DC$
- Se $I = AC$ con $\omega \sim GHz$ l'energia cinetica immagazzinata delle coppie di Cooper genera un ritardo tra I applicata e quella che circola nel superconduttore \rightarrow si genera una induttanza (L) detta appunto induttanza cinetica.
- Accoppiando una capacità (C) si realizza un circuito LC che risuona ad una determinata frequenza f_0
- Quando una particella interagisce con il superconduttore rompe coppie di Cooper producendo una variazione di L misurabile attraverso la variazione della risonanza (fase ed ampiezza)



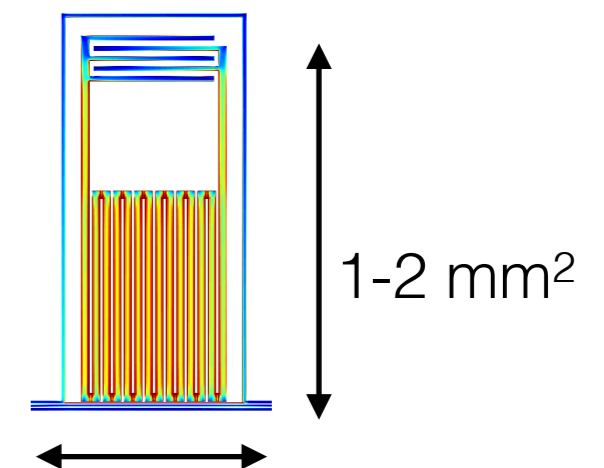
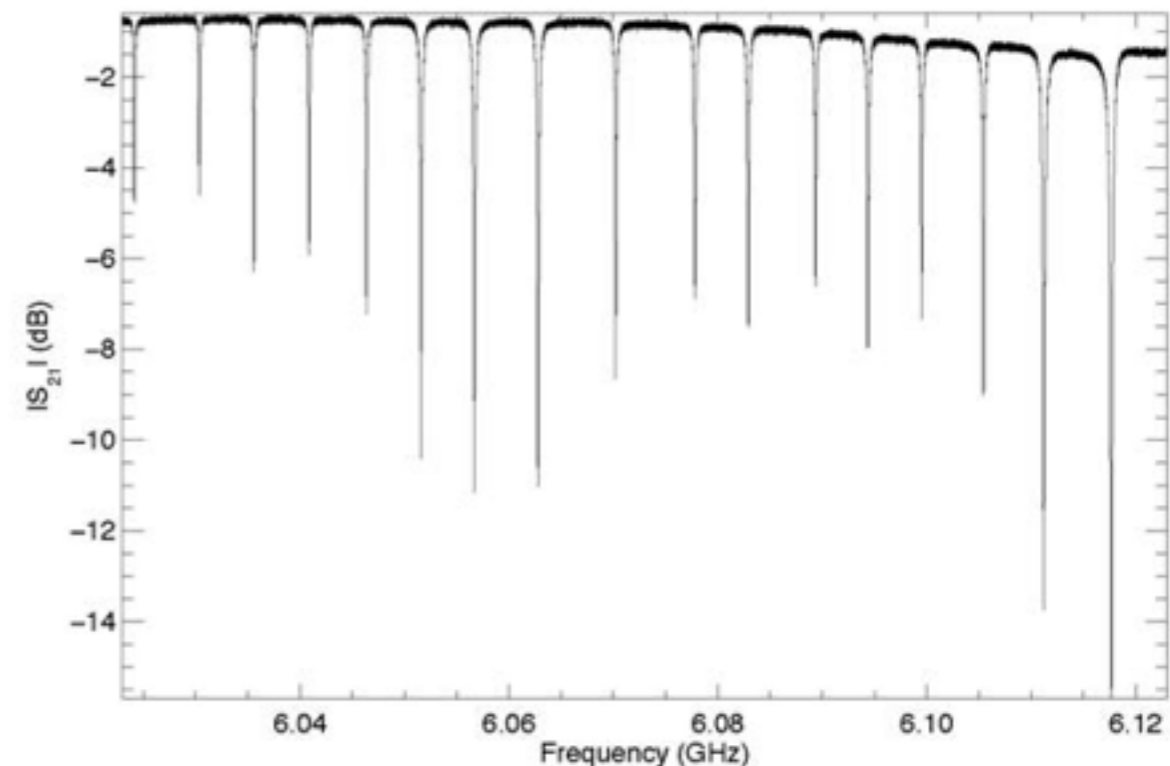
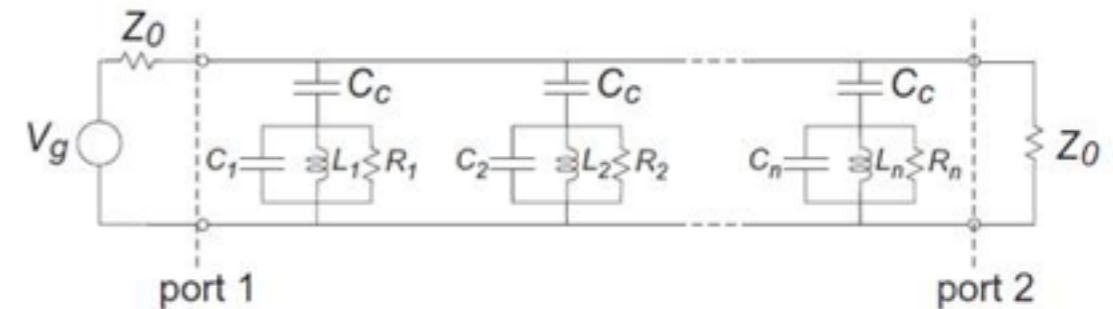
Pro e Contro

Pro

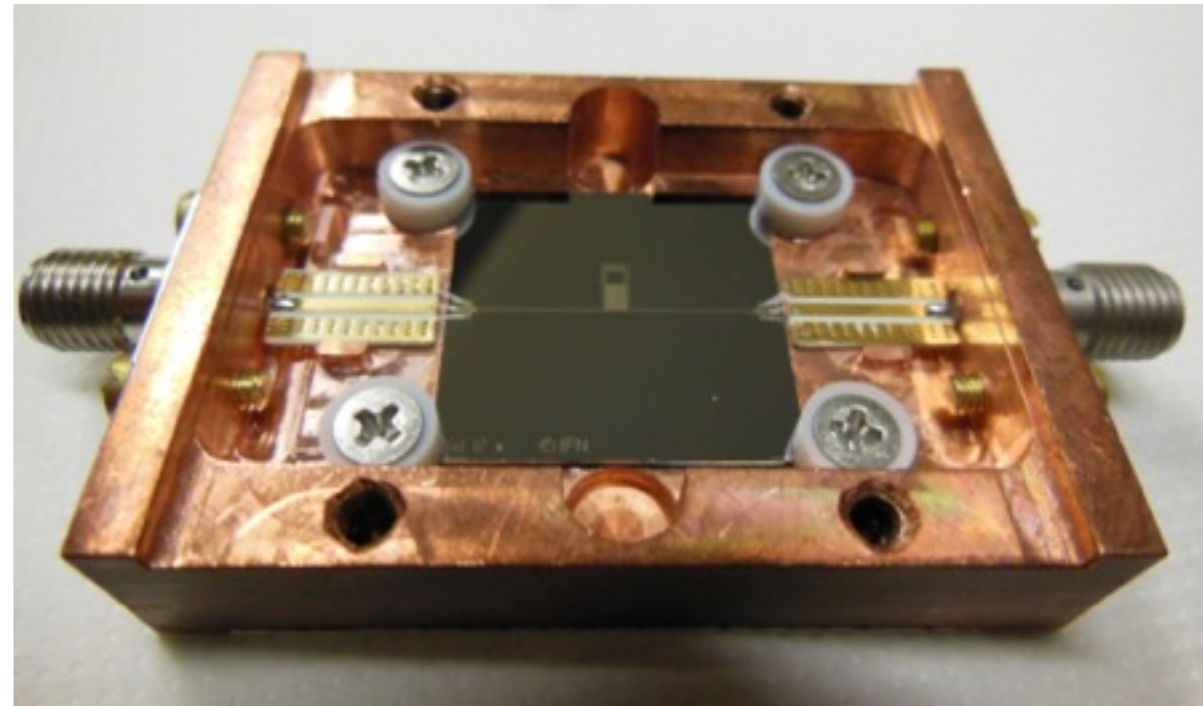
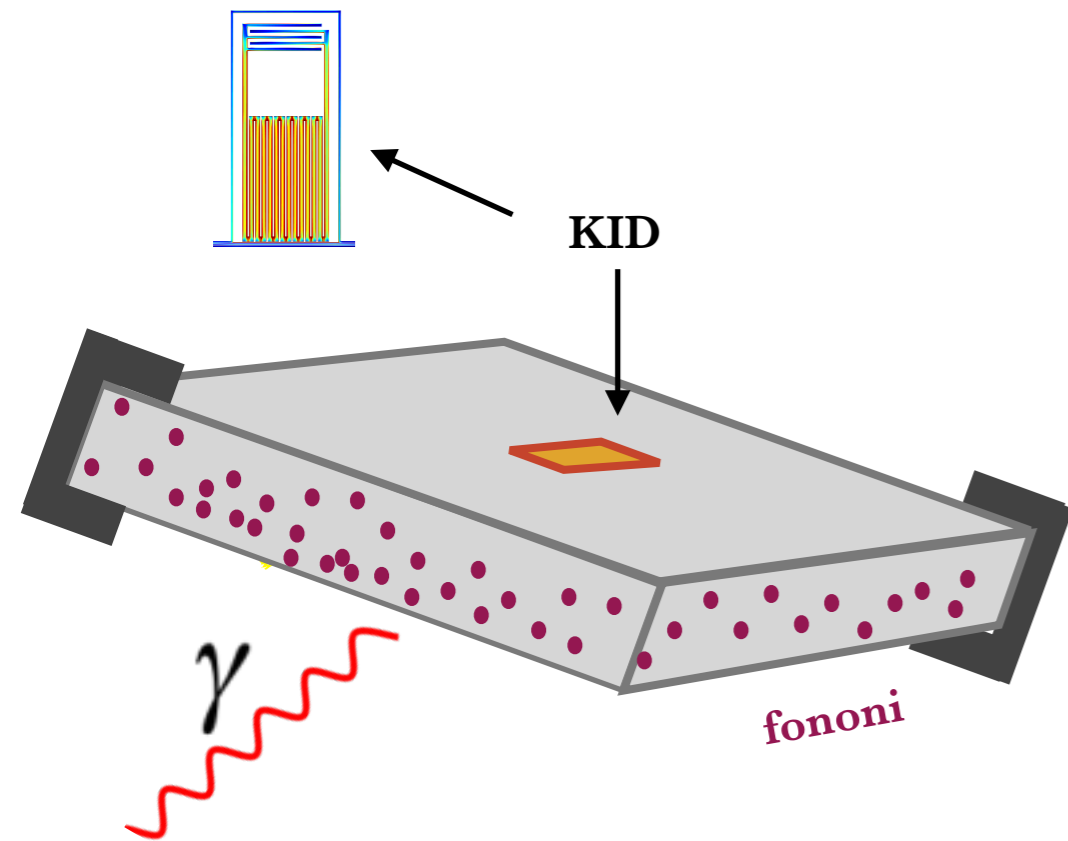
- Nati per essere multiplexabili nel dominio delle frequenze: generando un pettine di frequenze ognuna tunata sulla frequenza di risonanza del risonatore (~ 100 risonatori con una sola feed line)
- Elevata risoluzione energetica ($\sim eV$)
- Stabilità di funzionamento se $T \ll T_c$

Contro

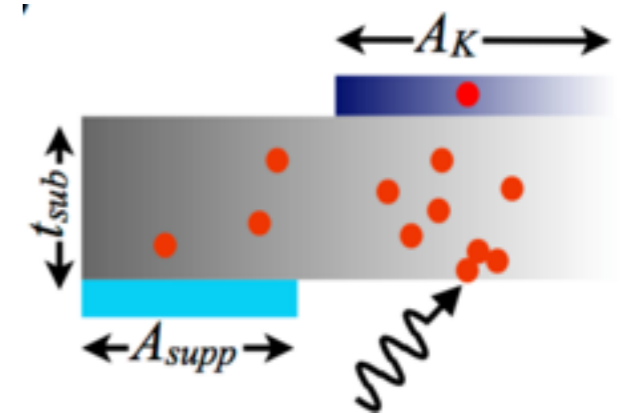
- Area attiva pochi mm^2



I fononi come mediatore



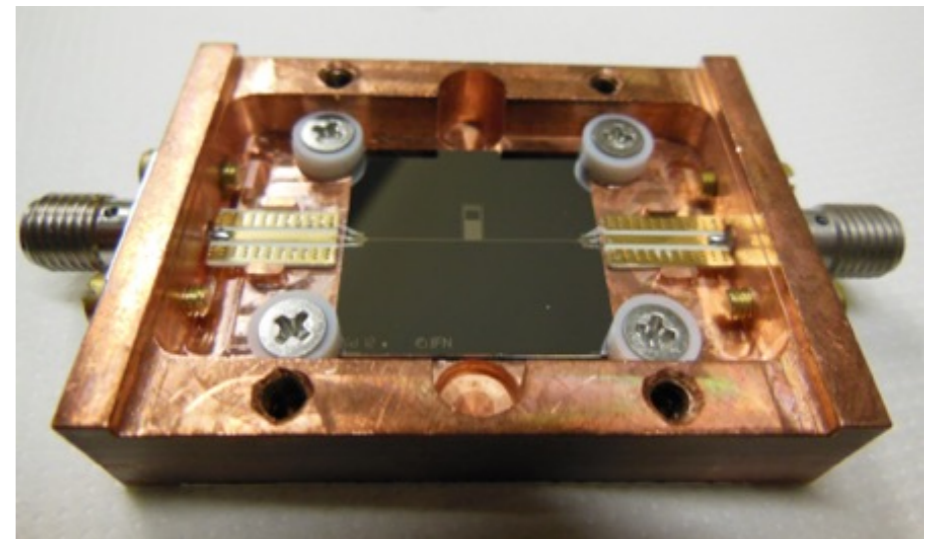
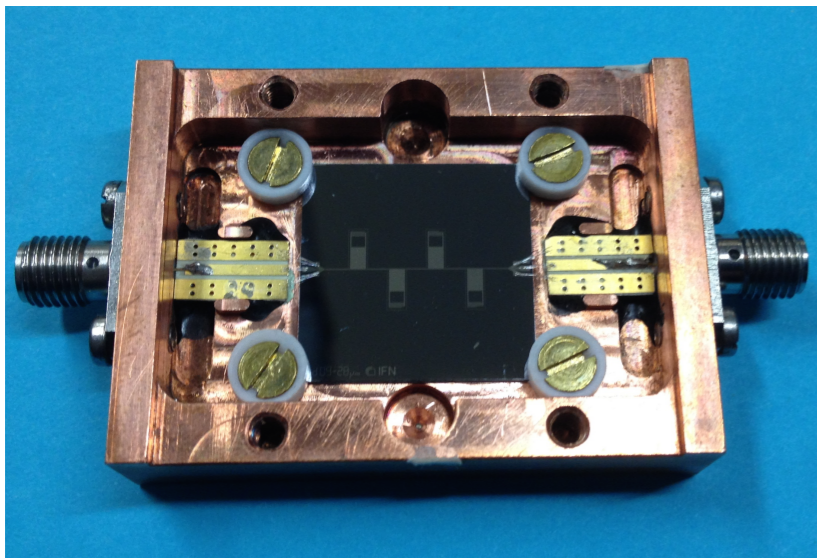
- Si deposita il materiale superconduttore su un isolante (substrato di Si) che media l'interazione delle particelle producendo fononi
- Questi, se assorbiti dal KID, causano la rottura delle coppie di Cooper e quindi una variazione di L
- In questo modo è possibile avere **grandi superfici sensibili (~cm²) usando pochi KIDs (problema di efficienza di raccolta dei fononi)**
- Questo è l'approccio usato da **CALDER**



$$\frac{1}{\epsilon} = 1 + \frac{1}{N_K A_K P_K} \left(A_{supp} P_{supp} + A_{sub} \frac{t_{sub}/v_{sound}}{\tau_{thermal}} \right)$$

CALDER

Cryogenic **W**ide-**A**rea **L**ight **D**etector with **E**xcellent **R**esolution
finanziato da ERC Starting Grant, dal marzo del 2014

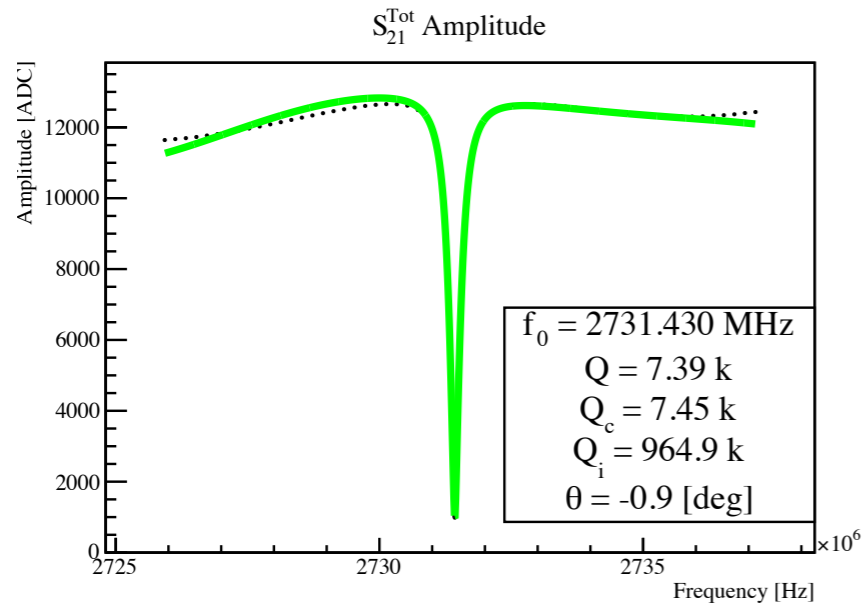


3 fasi principali

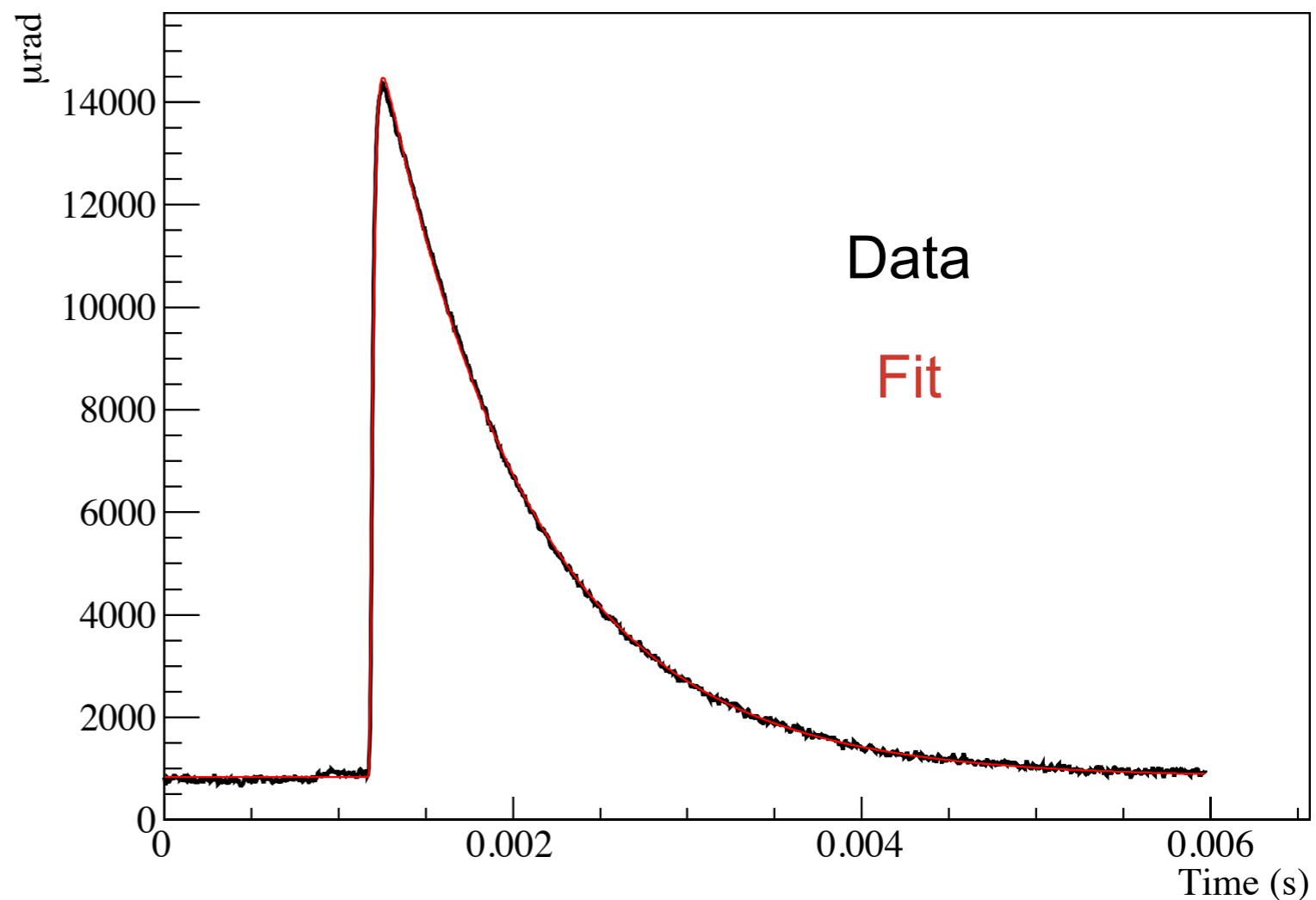
1. Ottimizzazione della geometria del rivelatore, e dell'analisi dati usando KIDs di Al (80 eV RMS)
2. Passare a superconduttori più sensibili (TiAl, TiN,) (< 20 eV)
3. Testare i lettori di luce finali ($5 \times 5 \text{ cm}^2$) su 4 bolometri di TeO_2 ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso

CALDER fase 1

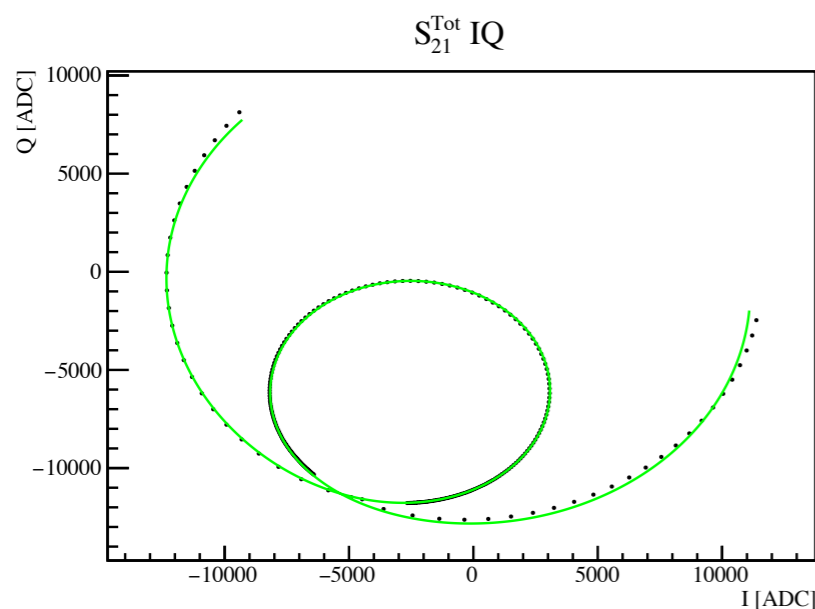
- Sviluppo degli strumenti di analisi dati per ricavare i parametri fondamentali della risonanza ed il modello di risposta del rivelatore



$$N_{qp}(t) = N_0 \tau_{qp} \left[\frac{\tau_{qp} e^{-t/\tau_{qp}}}{(\tau_{qp} - \tau_{ph})(\tau_{qp} - \tau_{ring})} + \frac{\tau_{ph} e^{-t/\tau_{ph}}}{(\tau_{ph} - \tau_{qp})(\tau_{ph} - \tau_{ring})} + \frac{\tau_{ring} e^{-t/\tau_{ring}}}{(\tau_{ring} - \tau_{qp})(\tau_{ring} - \tau_{ph})} \right]$$



$$S_{21} = 1 - \frac{Q/Q_c}{1 + 2jQ \frac{f-f_0}{f_0}}$$



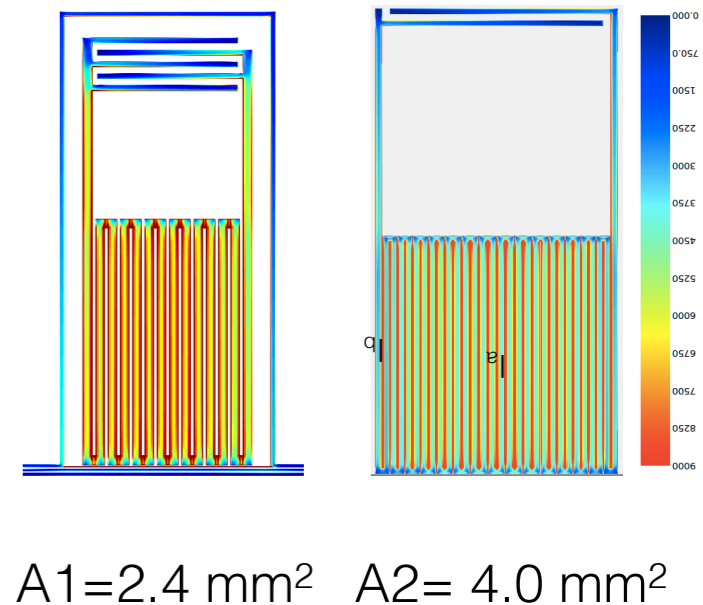
CALDER fase 1

- Ottimizzare la geometria del rivelatore per massimizzare il **segnale raccolto** e quindi la **risoluzione**

↓

$$\delta\phi = \frac{\alpha S_2(\omega, T)}{N_0 \Delta_0^2} \cdot \frac{Q}{V} \cdot \epsilon E$$

dipendenti dal materiale superconduttore dipendenti dalla geometria



I rivelatori sono testati con segnali ottici (LED da 400 nm + fibra ottica) con E da 1.3 a 30 keV, ma anche con sorgenti a raggi-X di ⁵⁵Fe/⁵⁷Co (cross-check)

Variando spessore (s) e area attiva (A), l'efficienza ϵ scala come (sA)

- Pixel s: 25 nm, A: 2.4 mm² → $\epsilon \sim 2\%$
- Pixel s: 40 nm, A: 2.4 mm² → $\epsilon \sim 7\%$
- Pixel s: 40 nm, A: 4.0 mm² → $\epsilon \sim 11\%$

CALDER fase 1

- Ottimizzare la geometria del rivelatore per massimizzare il **segnale raccolto** e quindi la **risoluzione**

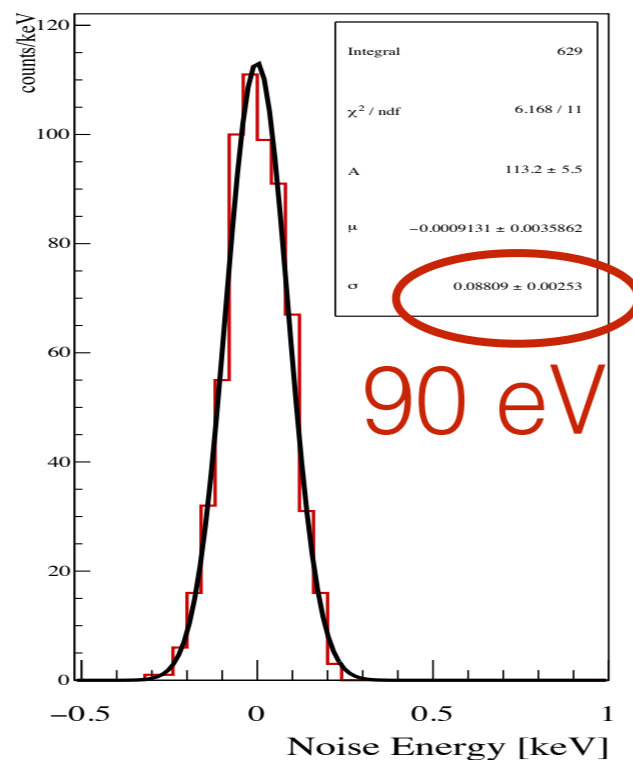
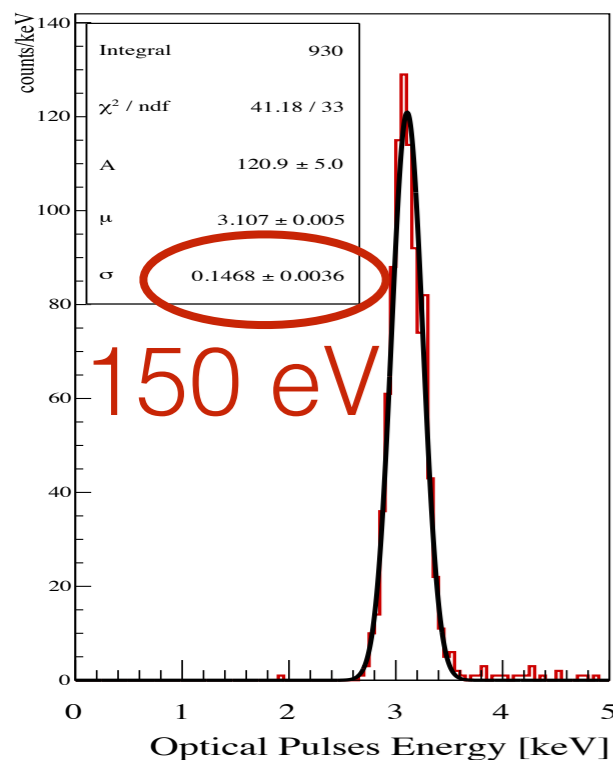
Nel caso (ideale) in cui siamo dominati dal rumore dell'amplificatore criogenico

$$\sigma_E = \frac{2N_0\Delta_0^2}{\alpha S_2(\omega, T)} \frac{V}{Q\epsilon} \sqrt{\frac{kT_N}{P_f\tau_{qp}}}$$

dipendenti dal materiale superconduttore

dipendenti dalla geometria

Variando V , α , Q e ϵ del KID la risoluzione varia tra 160 e 90 eV.



CALDER fase 1

- Ottimizzare la geometria del rivelatore per massimizzare il **segnale raccolto** e quindi la **risoluzione**

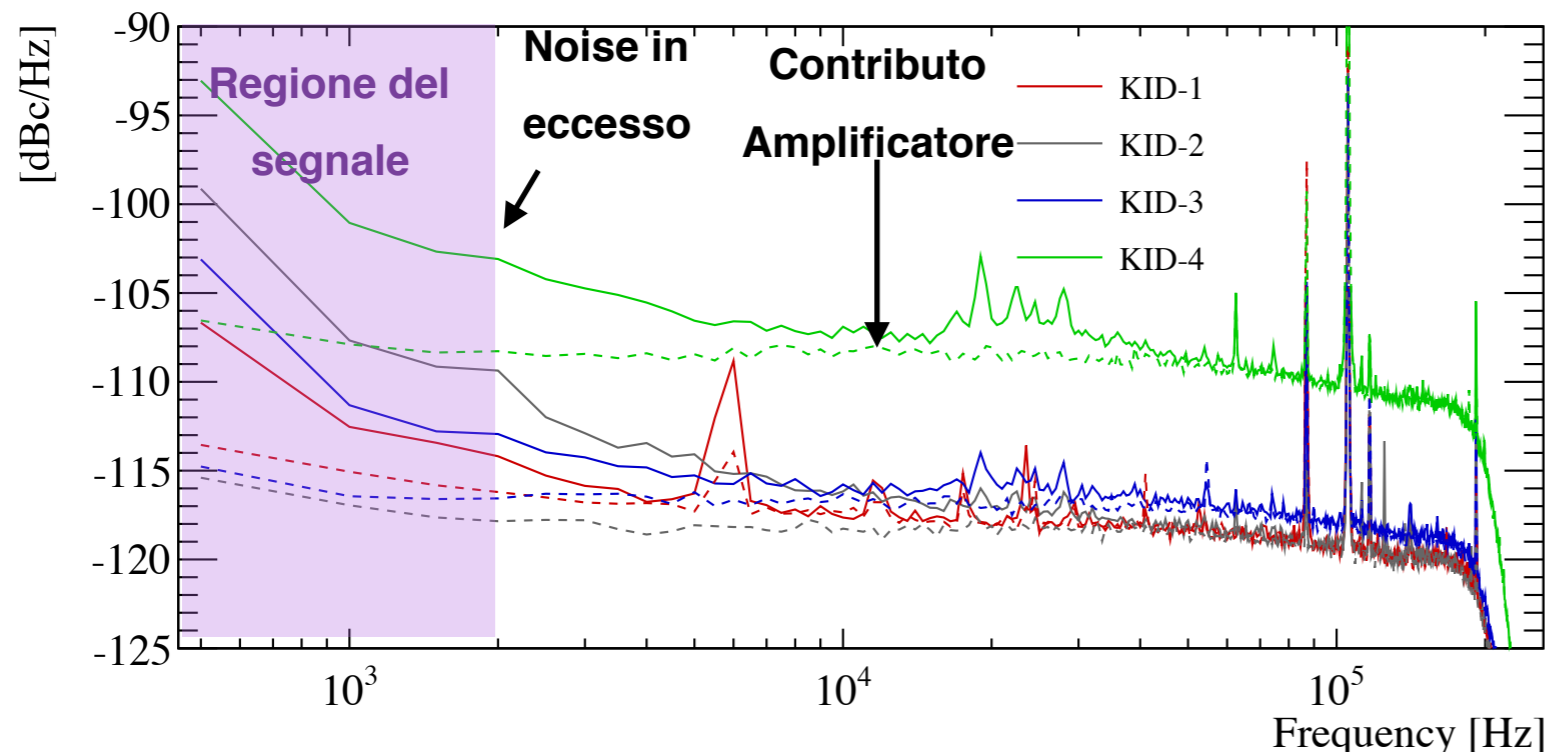
Nel caso (ideale) in cui siamo dominati dal rumore dell'amplificatore criogenico

$$\sigma_E = \frac{2N_0\Delta_0^2}{\alpha S_2(\omega, T)} \left[\frac{V}{Q\epsilon} \right] \sqrt{\frac{kT_N}{P_f \tau_{qp}}}$$

dipendenti dal materiale superconduttore

dipendenti dalla geometria

Variando V , α , Q e ϵ del KID la risoluzione varia tra 160 e 90 eV.



- Il segnale in fase è affetto da un rumore a bassa frequenza che limita la risoluzione
- La sua origine è in fase di studio...
- Nonostante questo il target di 80 eV RMS può essere considerato raggiunto

CALDER fase 2

- Testare risonatori realizzati con superconduttori più sensibili

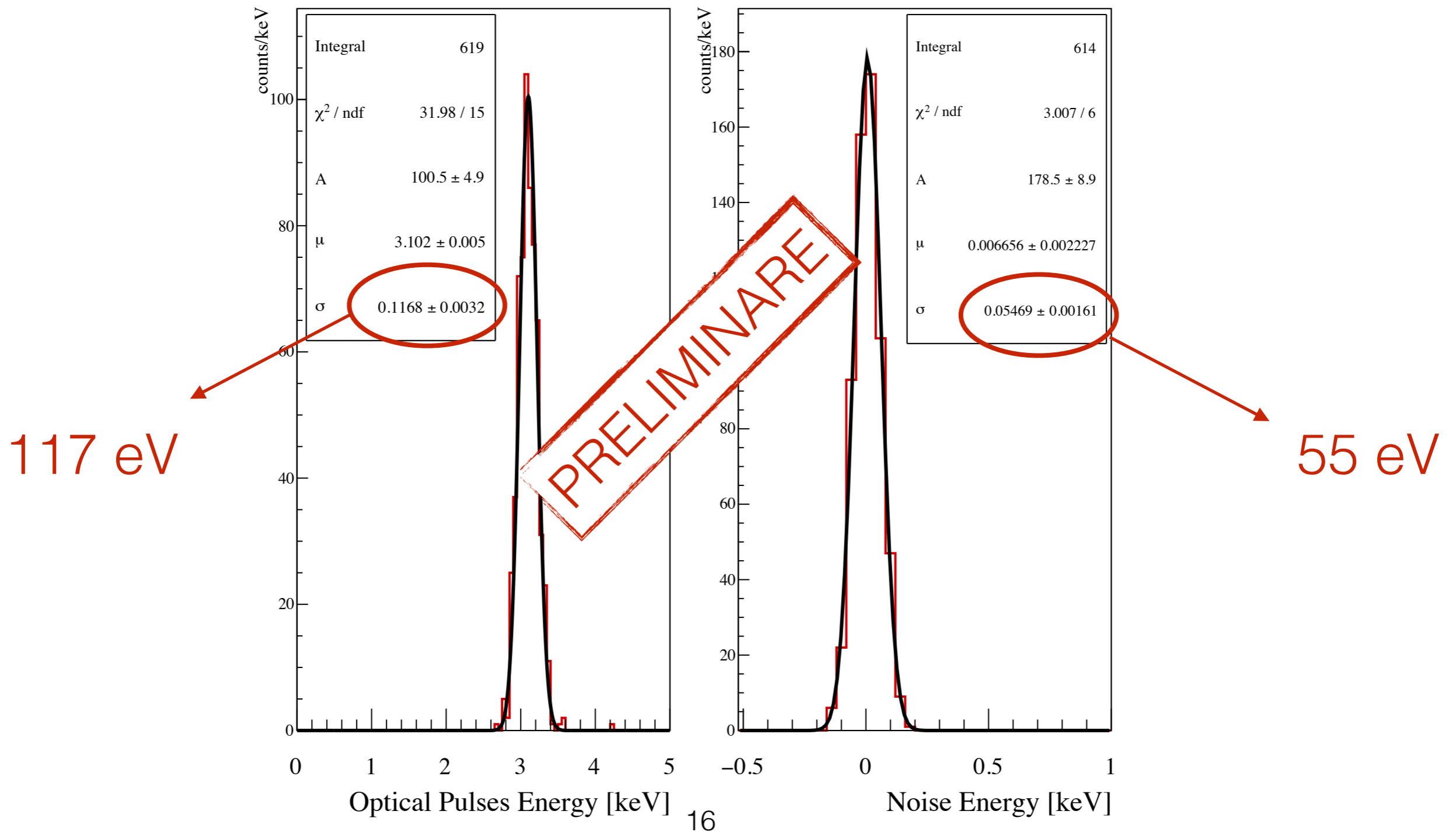
$$\Delta E \propto \frac{T_C}{\epsilon \sqrt{QL}}$$

	Al	TiAl	Ti+TiN	TiN sub- stec.
T _c [K]	1,2	0.6-0.9	0.5-0.8	0,5
L [pH/ square]	0,5	1	6	up to 50

Primo materiale testato dopo l'Al sarà il TiAl (prodotto dal CSNSM & Grenoble)

CALDER fase 2

Risultati preliminari utilizzando impulsi ottici con energia di 3.1 keV



Conclusioni

- La prossima generazione di esperimenti bolometrici necessita di rivelatori di luce con elevata sensibilità
- CALDER intende dimostrare che questi lettori di luce possono essere sviluppati usando i rivelatori ad induttanza cinetica (KID)
- L'ottimizzazione di risonatori di Al è terminata ed è stata raggiunta la risoluzione di 90 eV RMS
- È stato identificato un eccesso di noise in fase a bassa frequenza la cui natura è in fase di studio
- Sono iniziati i test su superconduttori più sensibili ed i risultati sono molto incoraggianti: 50 eV RMS usando TiAl (**preliminare**)