



IFAE 2025

Incontri di Fisica delle Alte Energie

Cagliari, 9-11 Aprile 2025

BULLKID-DM

Ricerca di WIMPs leggere con array monolitici di rivelatori

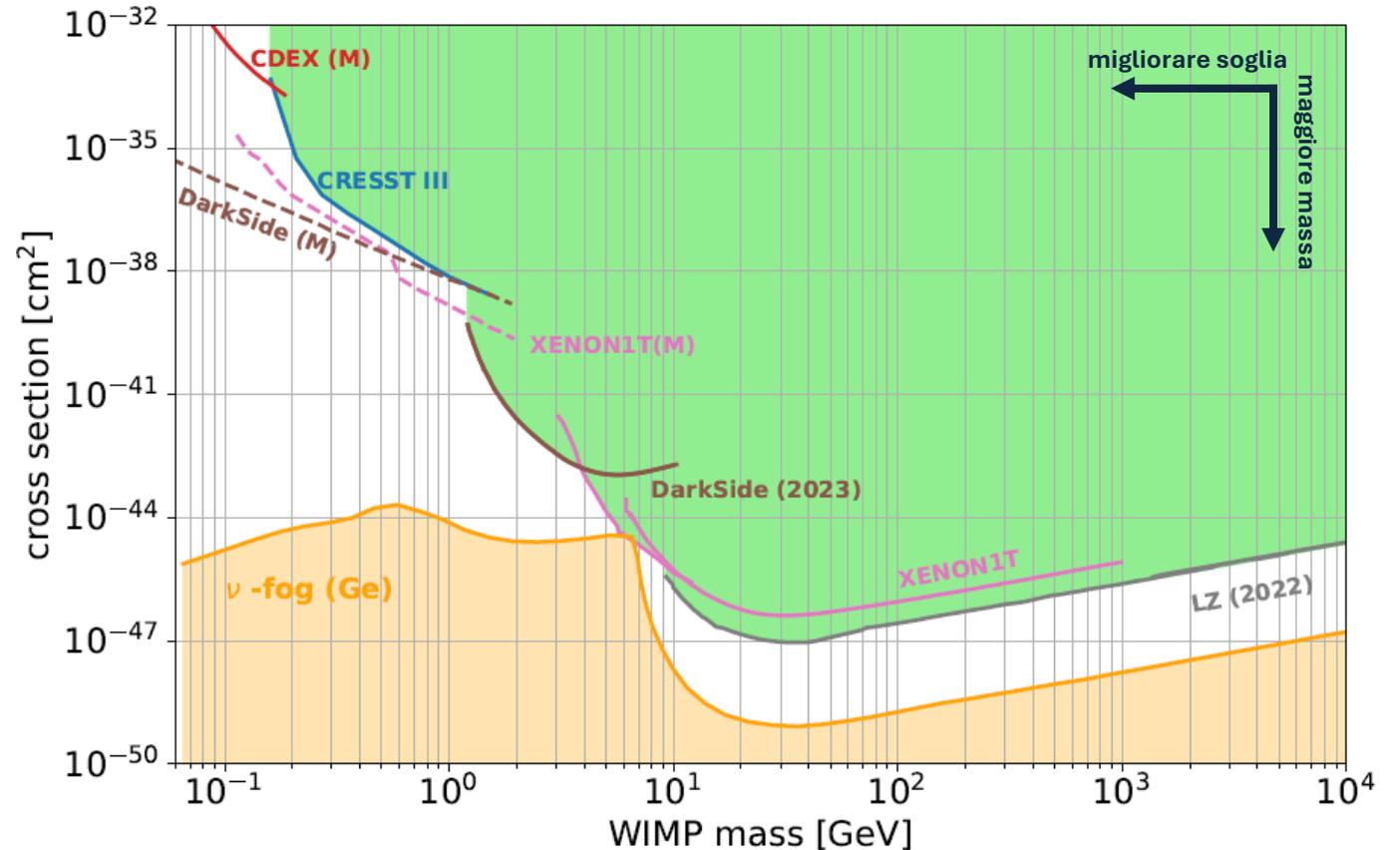
Davide Quaranta,
10 Aprile 2025



Dark Matter – Ricerca Diretta

Stato dell'arte

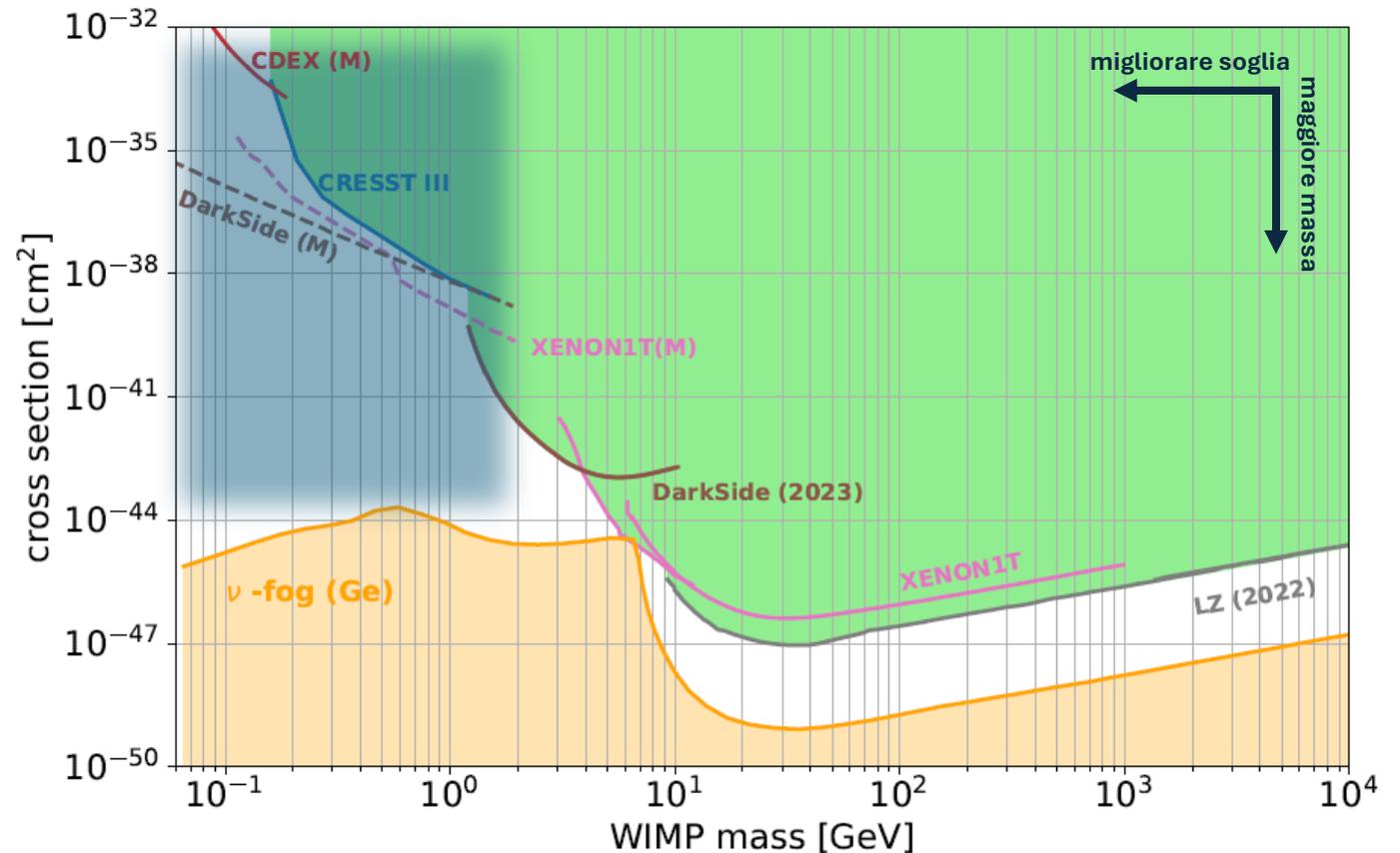
- Le WIMP sono il candidato più testato per la materia oscura
 - **Debolmente** interagenti ($\sigma \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$)
 - **Massive** ($m \sim o(\text{GeV})$)
- Ampia frazione dello spazio dei parametri già esclusa



Dark Matter – Ricerca Diretta

Stato dell'arte

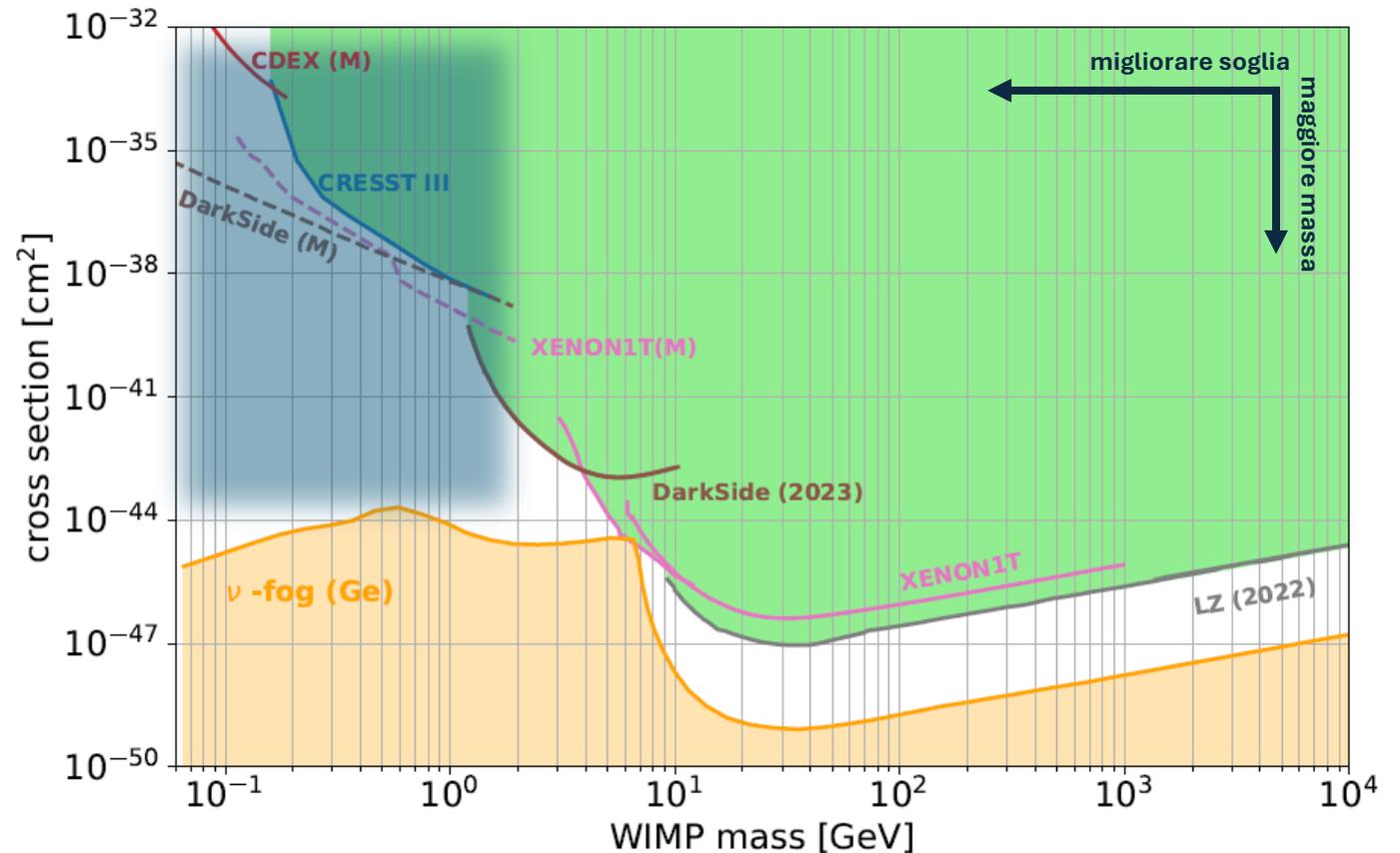
- Le WIMP sono il candidato più testato per la materia oscura
 - **Debolmente** interagenti ($\sigma \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$)
 - **Massive** ($m \sim o(\text{GeV})$)
- Ampia frazione dello spazio dei parametri già esclusa
- Come sondare la regione a **bassa** $m - \sigma$?



Dark Matter – Ricerca Diretta

Stato dell'arte

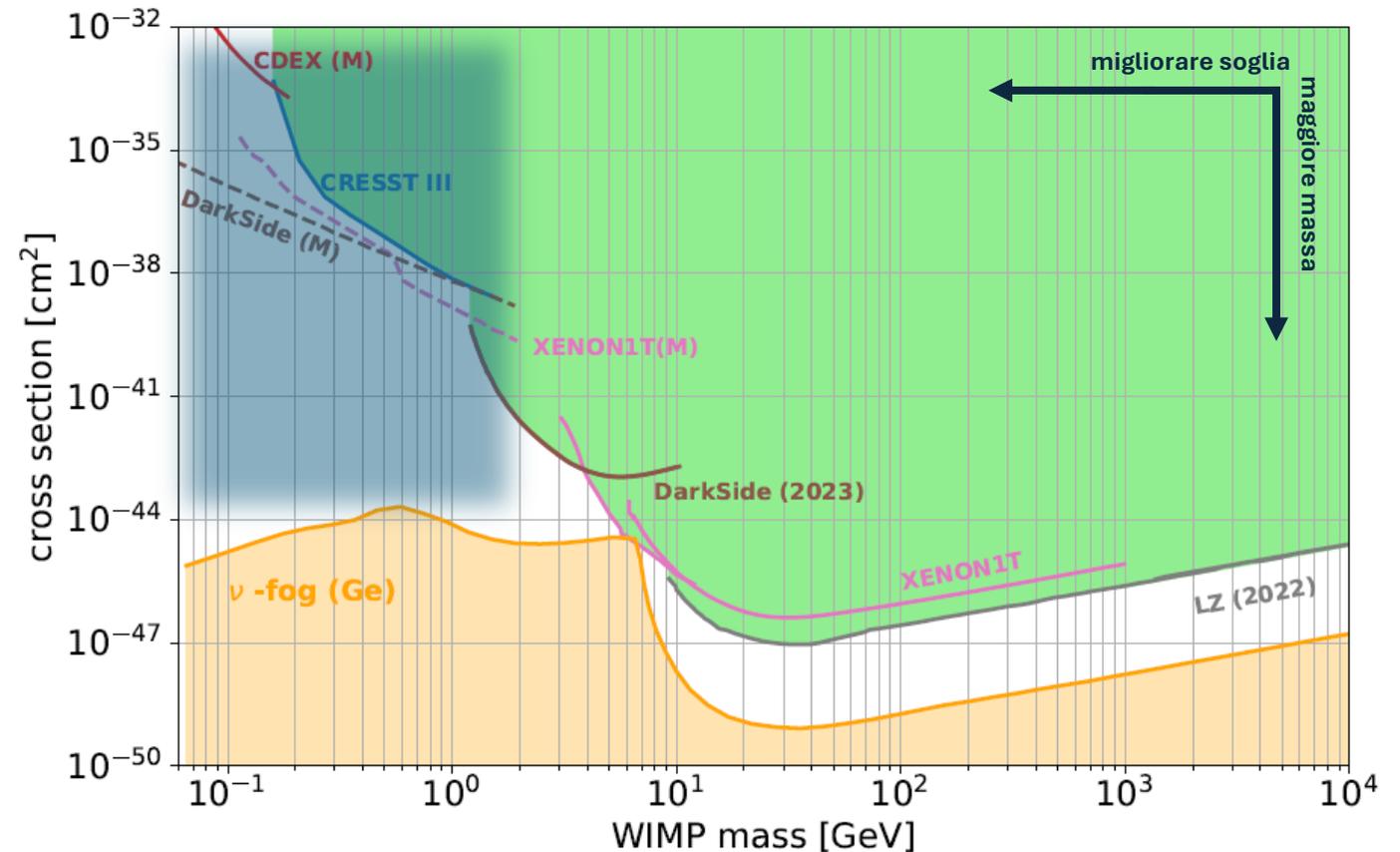
- Le WIMP sono il candidato più testato per la materia oscura
 - **Debolmente** interagenti ($\sigma \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$)
 - **Massive** ($m \sim o(\text{GeV})$)
- Ampia frazione dello spazio dei parametri già esclusa
- Come sondare la regione a **bassa** $m - \sigma$?
 - Migliore **soglia in energia**



Dark Matter – Ricerca Diretta

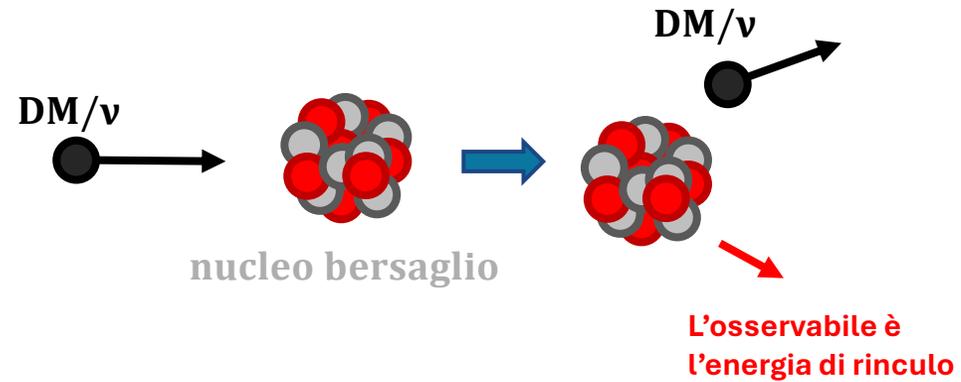
Stato dell'arte

- Le WIMP sono il candidato più testato per la materia oscura
 - **Debolmente** interagenti ($\sigma \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$)
 - **Massive** ($m \sim o(\text{GeV})$)
- Ampia frazione dello spazio dei parametri già esclusa
- Come sondare la regione a **bassa** $m - \sigma$?
 - Migliore **soglia in energia**
 - Maggiore **massa target**



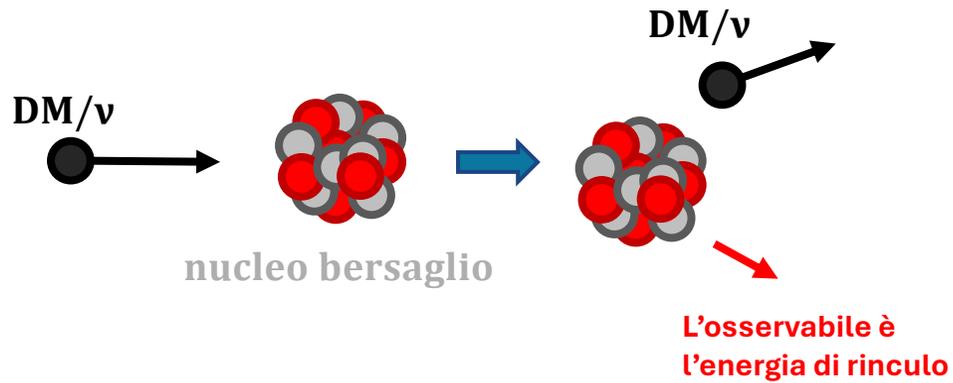
Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare



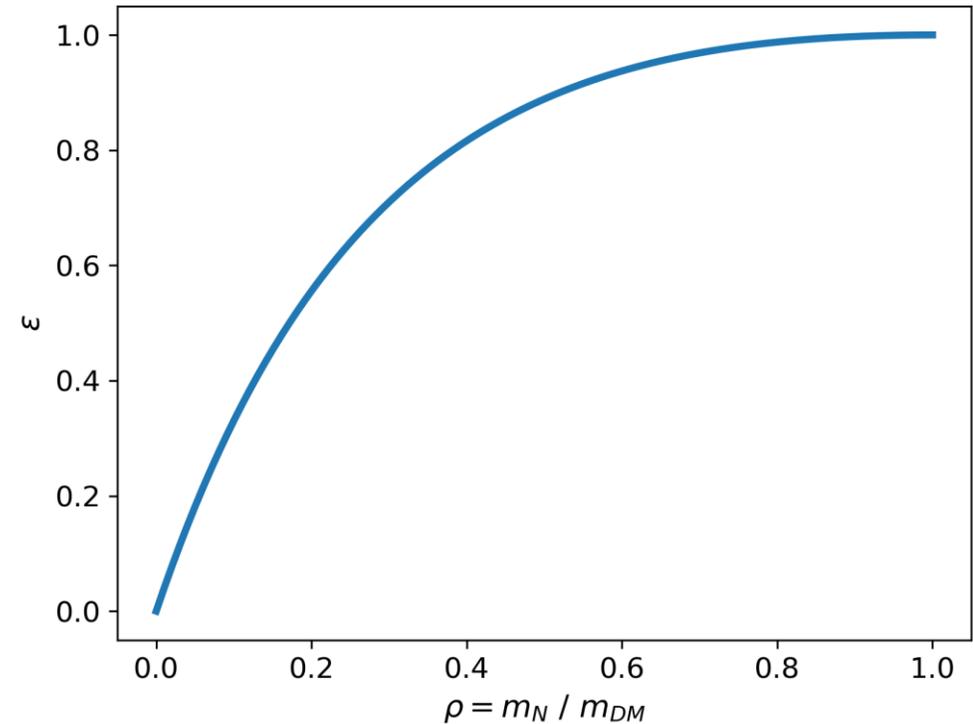
Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare



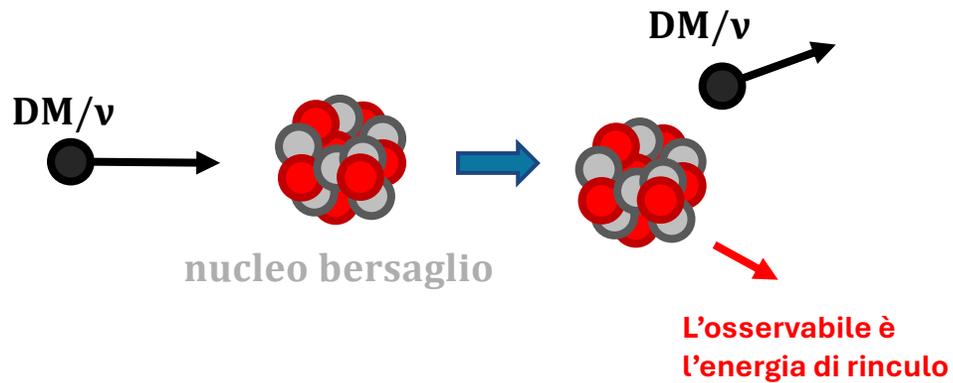
- Essendo uno scattering elastico:

$$\epsilon = \frac{4\rho}{(\rho + 1)^2}$$



Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare

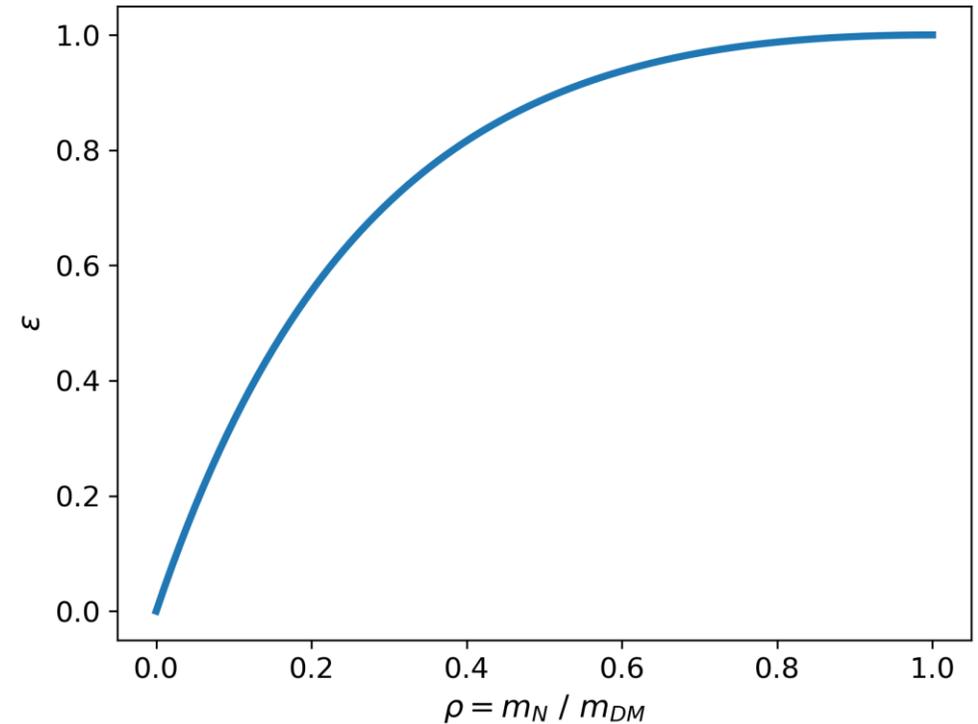


- Essendo uno scattering elastico:

$$\epsilon = \frac{4\rho}{(\rho + 1)^2}$$

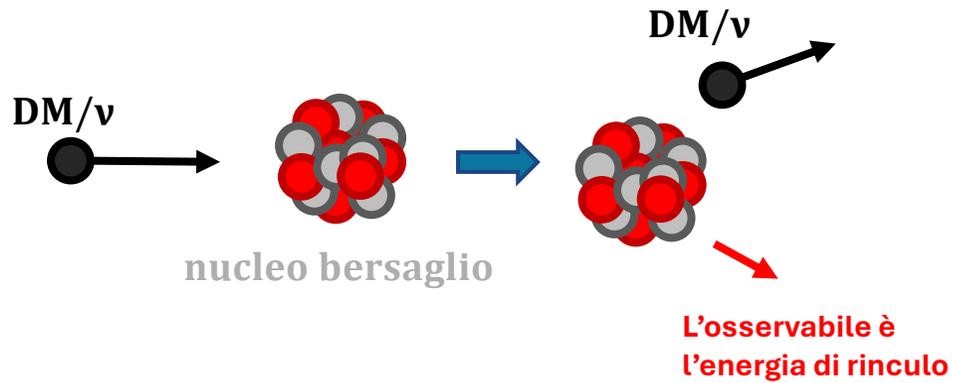
Frazione di energia trasferita al nucleo

$$\rho = \frac{m_N}{m_{DM}}$$



Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare

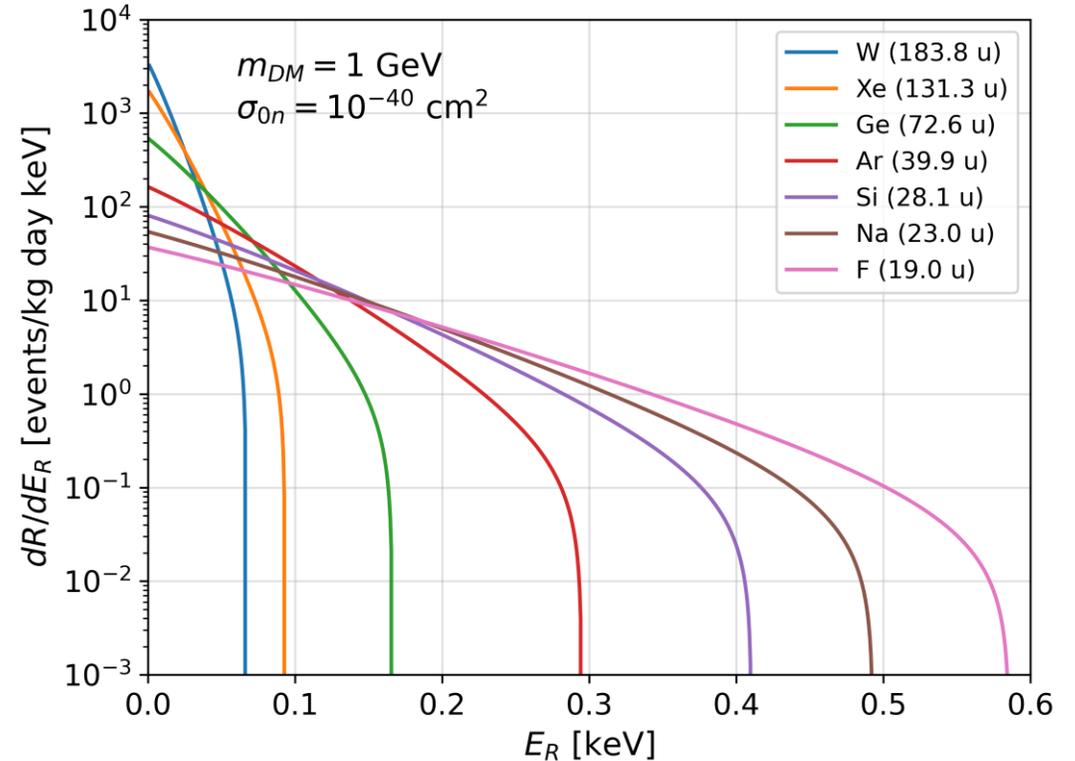


- Essendo uno scattering elastico:

$$\epsilon = \frac{4\rho}{(\rho + 1)^2}$$

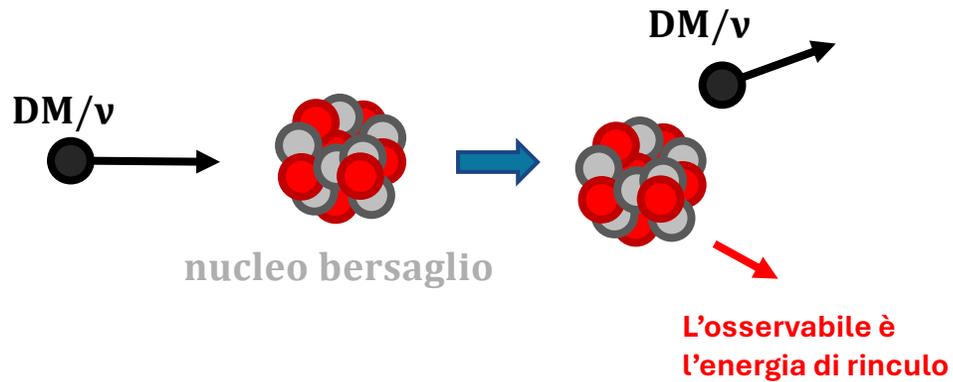
Frazione di energia trasferita al nucleo

$$\rho = \frac{m_N}{m_{DM}}$$



Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare

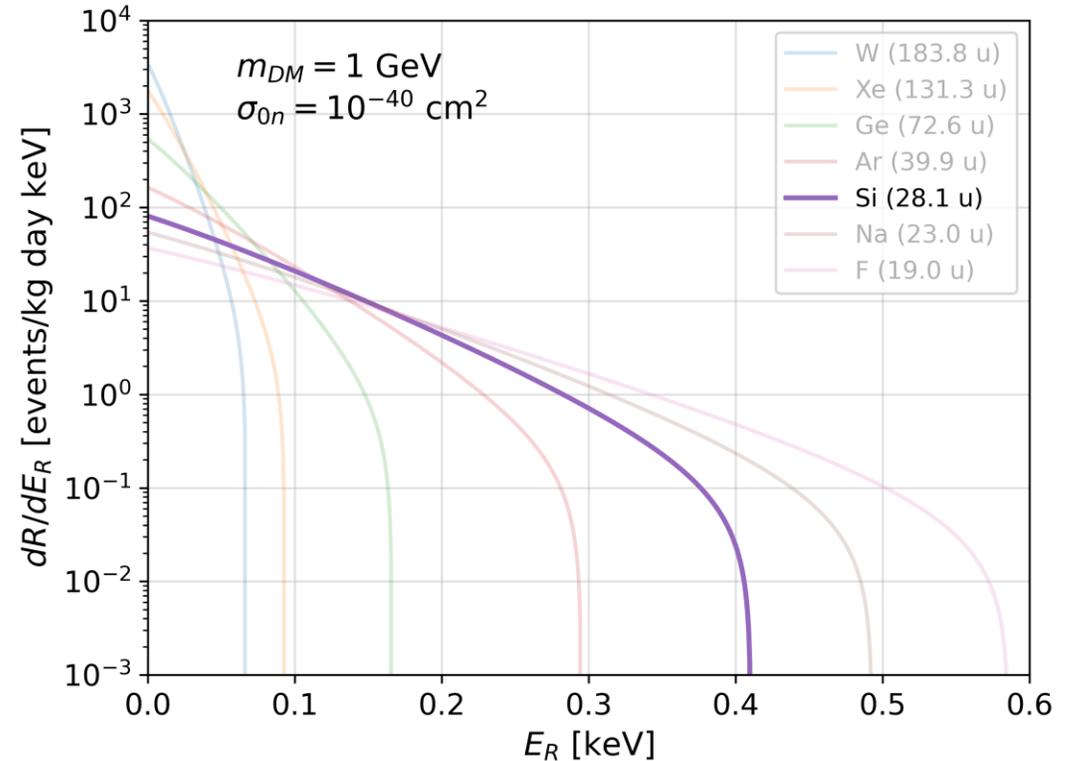


- Essendo uno scattering elastico:

$$\epsilon = \frac{4\rho}{(\rho + 1)^2}$$

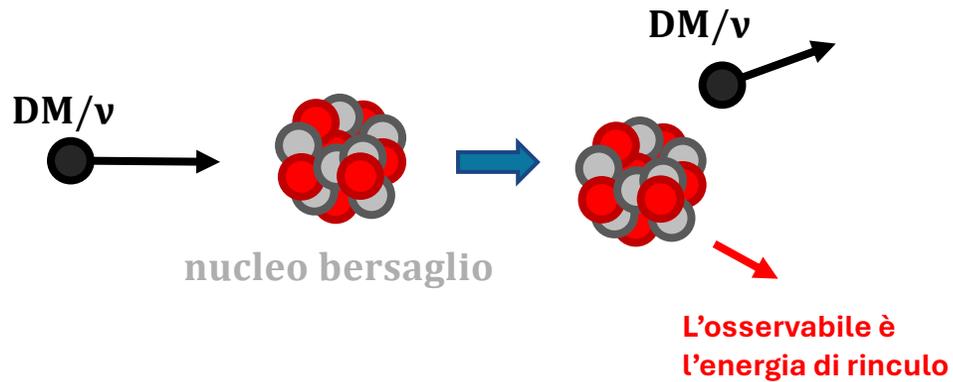
Frazione di energia trasferita al nucleo

$$\rho = \frac{m_N}{m_{DM}}$$



Dark Matter – Ricerca Diretta

Rinculo Nucleare

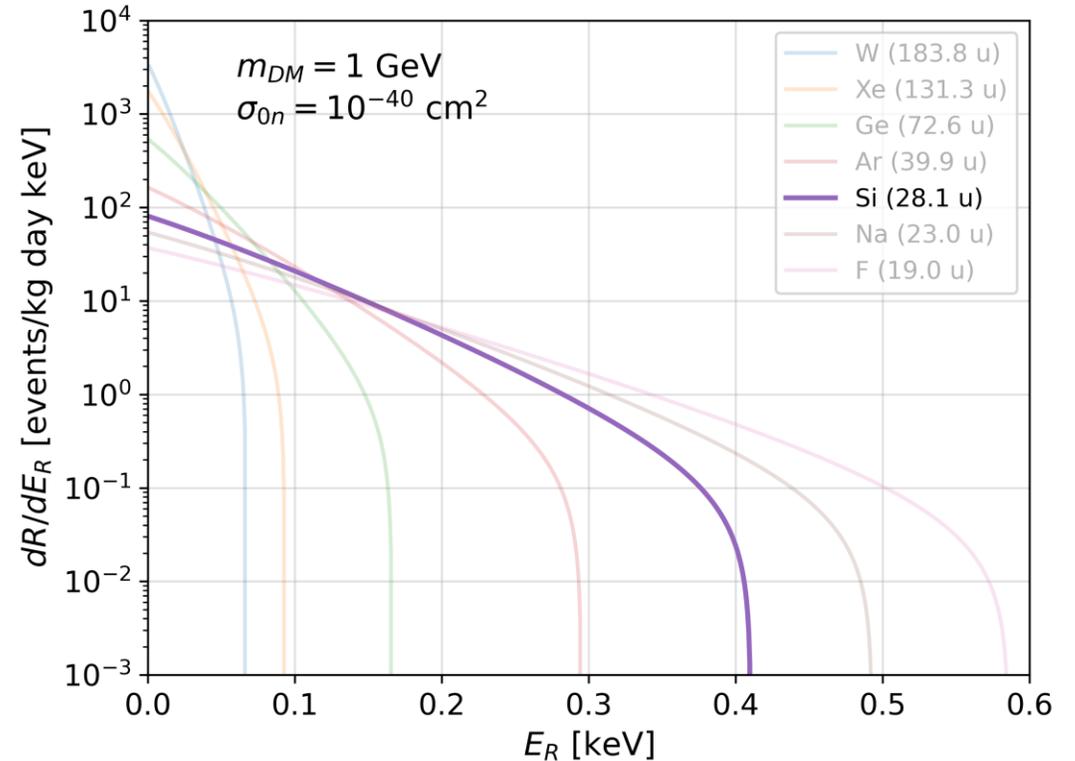


- Essendo uno scattering elastico:

$$\epsilon = \frac{4\rho}{(\rho + 1)^2}$$

Frazione di energia trasferita al nucleo

$$\rho = \frac{m_N}{m_{DM}}$$



Come rivelare questa energia?

Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (ϵ)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	~ 10 -100 eV
Coppie e-h	~ 1 -5 eV
Fononi	$< \text{meV}$

Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (e)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	~ 10-100 eV
Coppie e-h	~ 1-5 eV
Fononi	< meV

*i fononi sono i quanti delle vibrazioni del reticolo cristallino

Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (ϵ)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	~ 10 -100 eV
Coppie e-h	~ 1 -5 eV
Fononi	$< \text{meV}$

*i fononi sono i quanti delle vibrazioni del reticolo cristallino

- E : rilascio di energia nel rivelatore
- ϵ : energia per produrre un portatore
- $N = E/\epsilon$: numero di portatori prodotti
- $\Delta E = \epsilon \Delta N = \sqrt{\epsilon E}$: risoluzione in energia

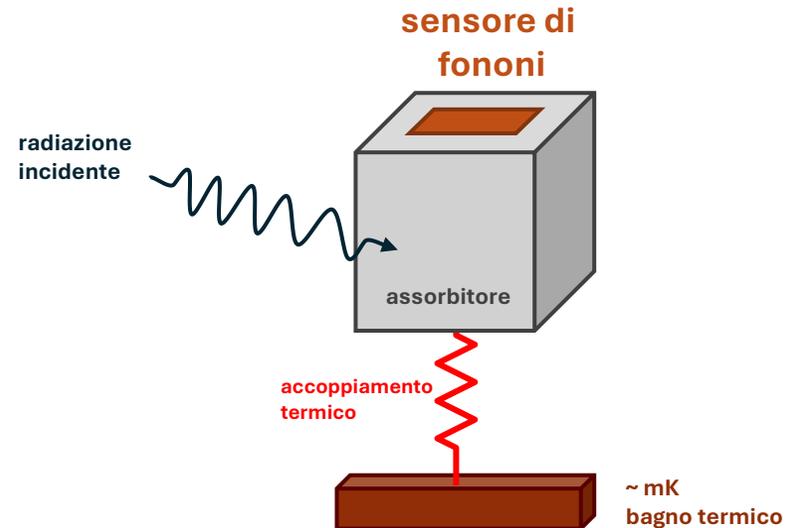
Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (ϵ)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	$\sim 10-100$ eV
Coppie e-h	$\sim 1-5$ eV
Fononi	$< \text{meV}$

*i fononi sono i quanti delle vibrazioni del reticolo cristallino

- E : rilascio di energia nel rivelatore
- ϵ : energia per produrre un portatore
- $N = E/\epsilon$: numero di portatori prodotti
- $\Delta E = \epsilon \Delta N = \sqrt{\epsilon E}$: risoluzione in energia



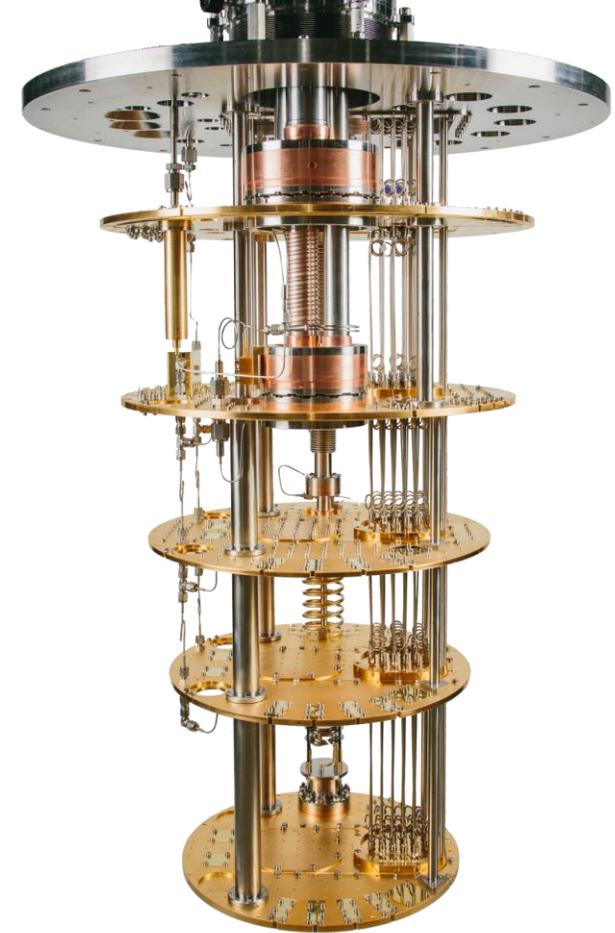
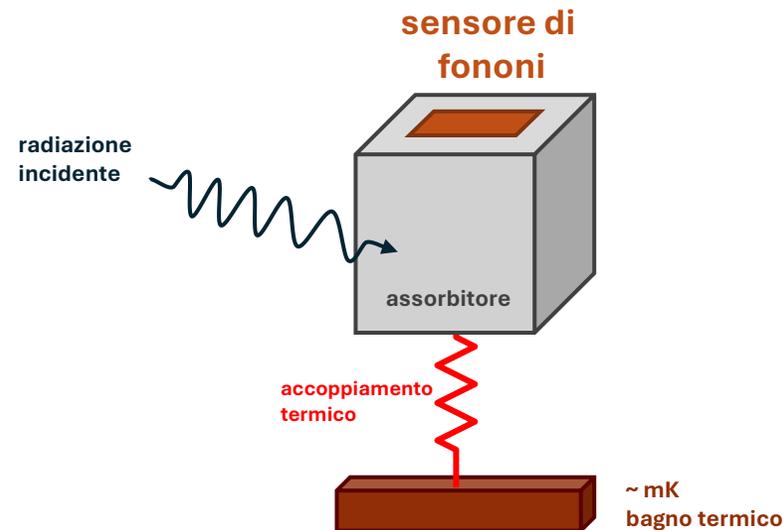
Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (ϵ)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	~ 10 -100 eV
Coppie e-h	~ 1 -5 eV
Fononi	$< \text{meV}$

*i fononi sono i quanti delle vibrazioni del reticolo cristallino

- E : rilascio di energia nel rivelatore
- ϵ : energia per produrre un portatore
- $N = E/\epsilon$: numero di portatori prodotti
- $\Delta E = \epsilon \Delta N = \sqrt{\epsilon E}$: risoluzione in energia



❄️ Criostato a Diluzione ❄️

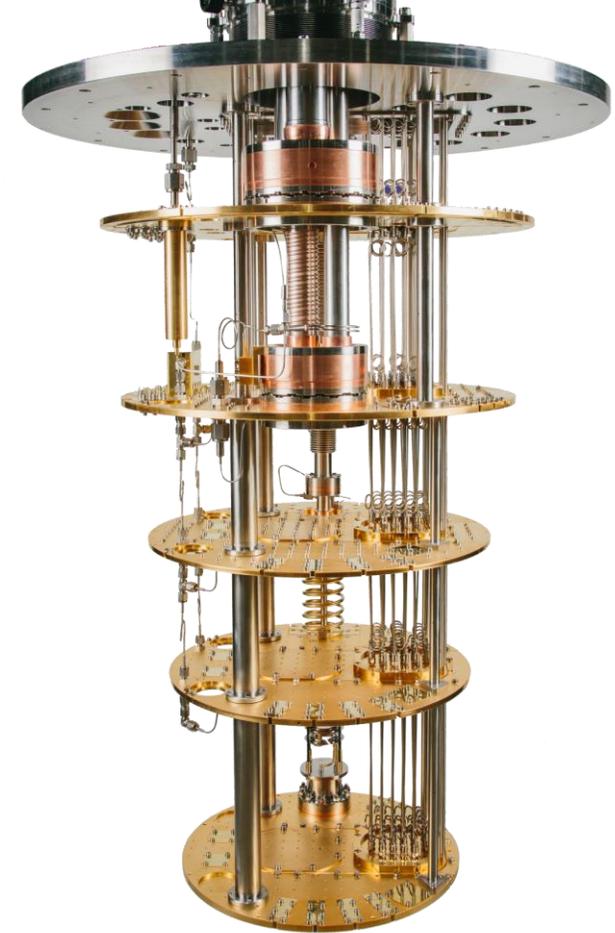
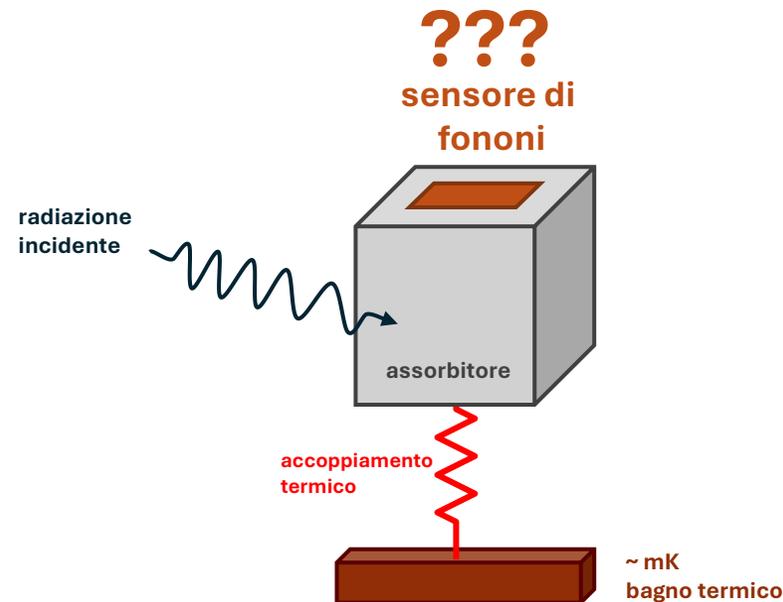
Dark Matter – Ricerca

Produzione del segnale

Processo	Costo Portatore (ϵ)
Ionizzazione	~ 30 eV (gas)
Scintillazione	~ 10 -100 eV
Coppie e-h	~ 1 -5 eV
Fononi	$< \text{meV}$

*i fononi sono i quanti delle vibrazioni del reticolo cristallino

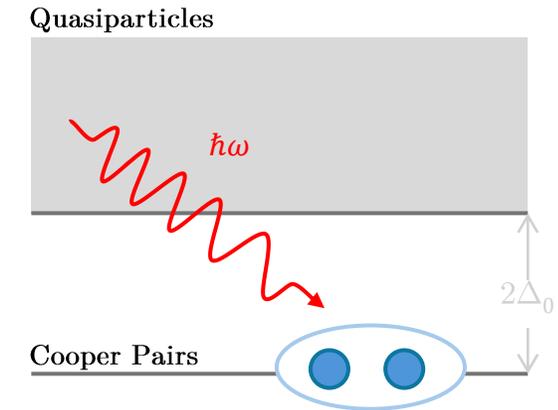
- E : rilascio di energia nel rivelatore
- ϵ : energia per produrre un portatore
- $N = E/\epsilon$: numero di portatori prodotti
- $\Delta E = \epsilon \Delta N = \sqrt{\epsilon E}$: risoluzione in energia



❄️ Criostato a Diluzione ❄️

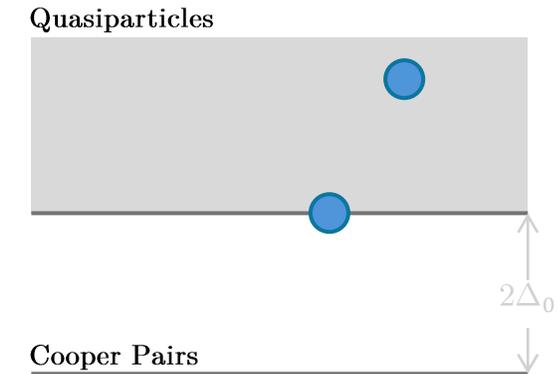
Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati $e^- e^-$
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$



Rivelatori ad Induttanza Cinetica

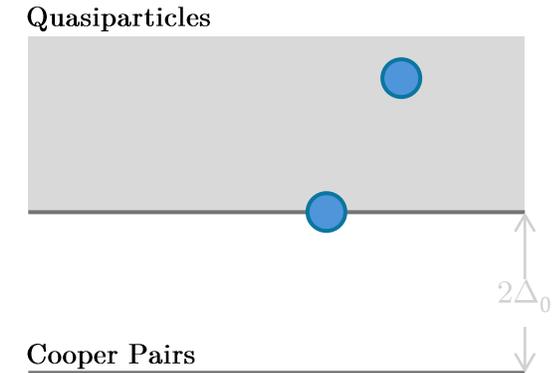
- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati e^-e^-
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$



Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati e^-e^-
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$
- Le coppie di Cooper contribuiscono all'induttanza del metallo superconduttore (**induttanza cinetica**)

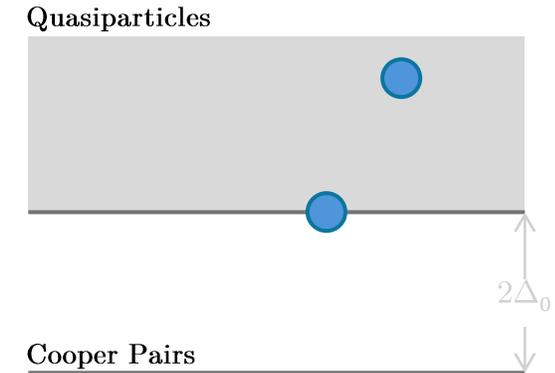
$$L_k = \frac{m_e}{2e^2 n_{\text{pairs}}} \quad L_{\text{tot}} = L_{\text{geom}} + L_k$$



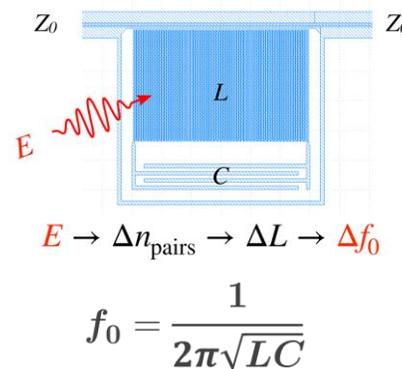
Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati e^-e^-
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$
- Le coppie di Cooper contribuiscono all'induttanza del metallo superconduttore (**induttanza cinetica**)

$$L_k = \frac{m_e}{2e^2 n_{\text{pairs}}} \quad L_{\text{tot}} = L_{\text{geom}} + L_k$$



KID starter pack



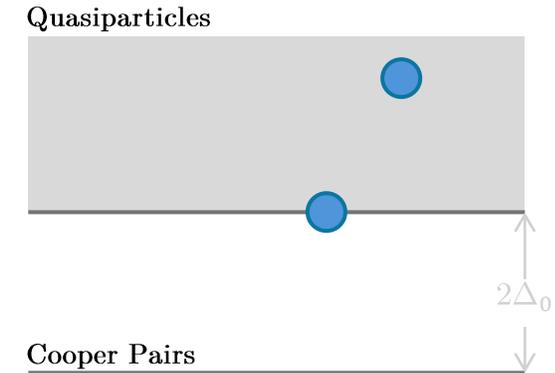
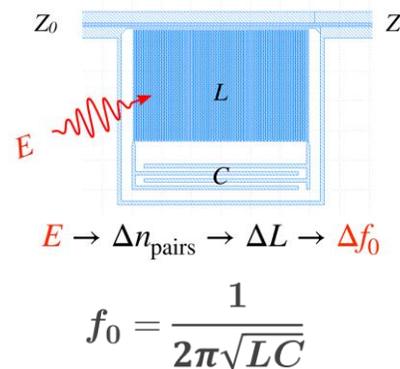
Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati e^-e^-
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$
- Le coppie di Cooper contribuiscono all'induttanza del metallo superconduttore (**induttanza cinetica**)

$$L_k = \frac{m_e}{2e^2 n_{\text{pairs}}} \quad L_{\text{tot}} = L_{\text{geom}} + L_k$$

KID starter pack

1. Risonatore LC superconduttore



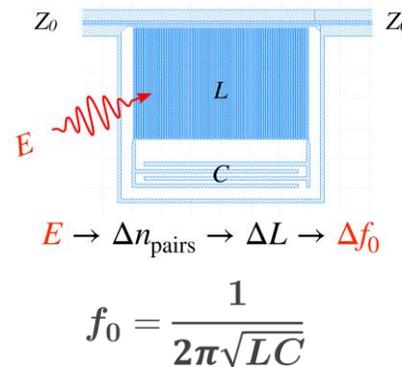
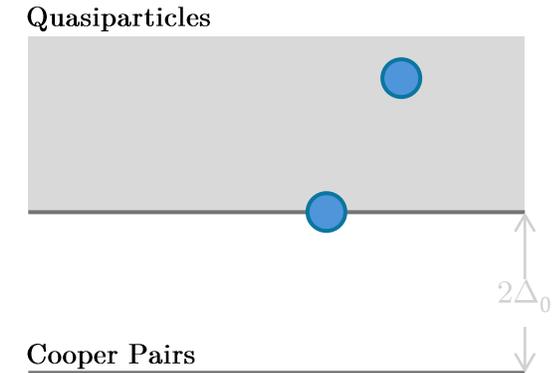
Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati $e^- e^-$
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$
- Le coppie di Cooper contribuiscono all'induttanza del metallo superconduttore (**induttanza cinetica**)

$$L_k = \frac{m_e}{2e^2 n_{\text{pairs}}} \quad L_{\text{tot}} = L_{\text{geom}} + L_k$$

KID starter pack

1. Risonatore LC superconduttore
2. Rilasci di energia rompono coppie di Cooper



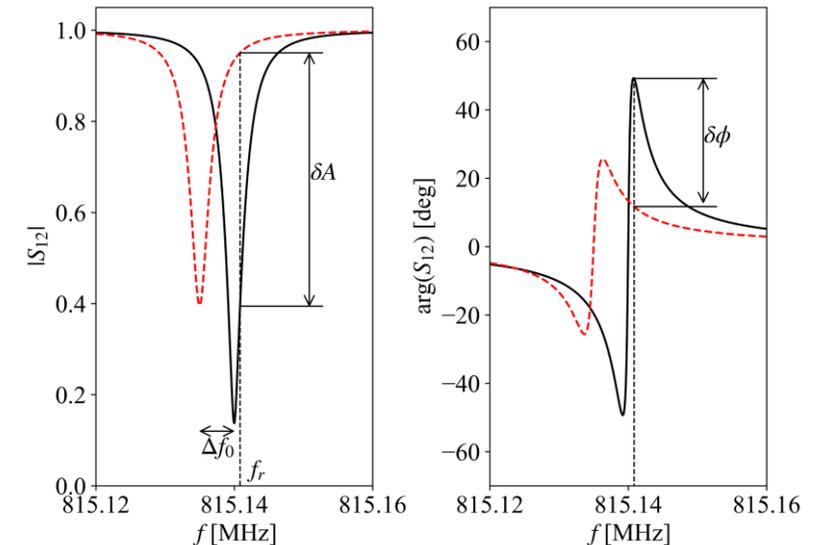
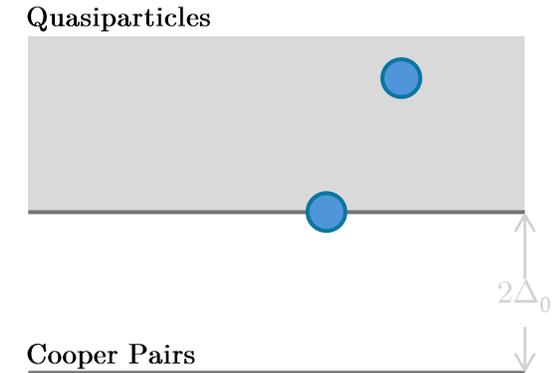
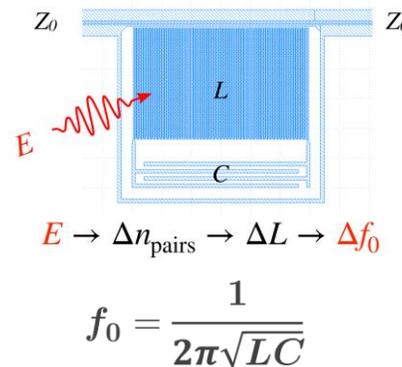
Rivelatori ad Induttanza Cinetica

- In un superconduttore a $T < T_c$, il flusso di corrente è dovuto alle **Coppie di Cooper**
 - Stati legati e^-e^-
 - Energia di legame $2\Delta_0 = 3.53k_B T_c$
- Le coppie di Cooper contribuiscono all'induttanza del metallo superconduttore (**induttanza cinetica**)

$$L_k = \frac{m_e}{2e^2 n_{\text{pairs}}} \quad L_{\text{tot}} = L_{\text{geom}} + L_k$$

KID starter pack

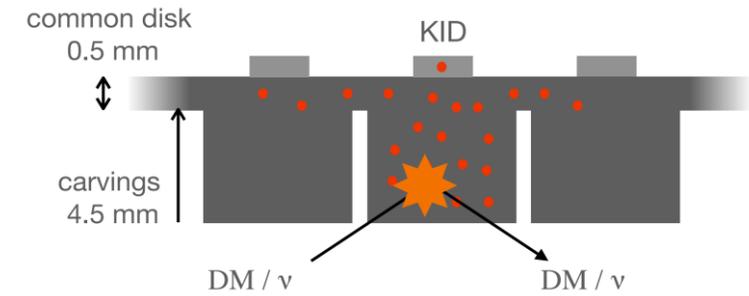
- Risonatore LC superconduttore
- Rilasci di energia rompono coppie di Cooper
- Spostamento della frequenza di risonanza



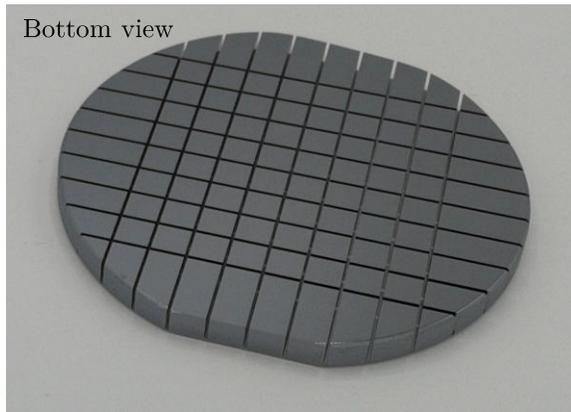
Il progetto BULLKID

Idea di base

Rilevare i **fononi** prodotti dalle interazioni delle particelle in un bersaglio rilevato da rivelatori **KIDs**



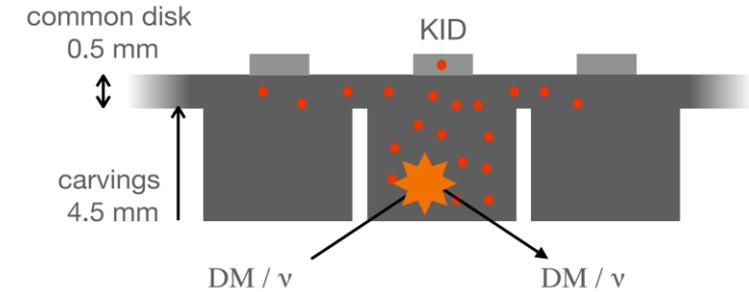
Il progetto BULLKID



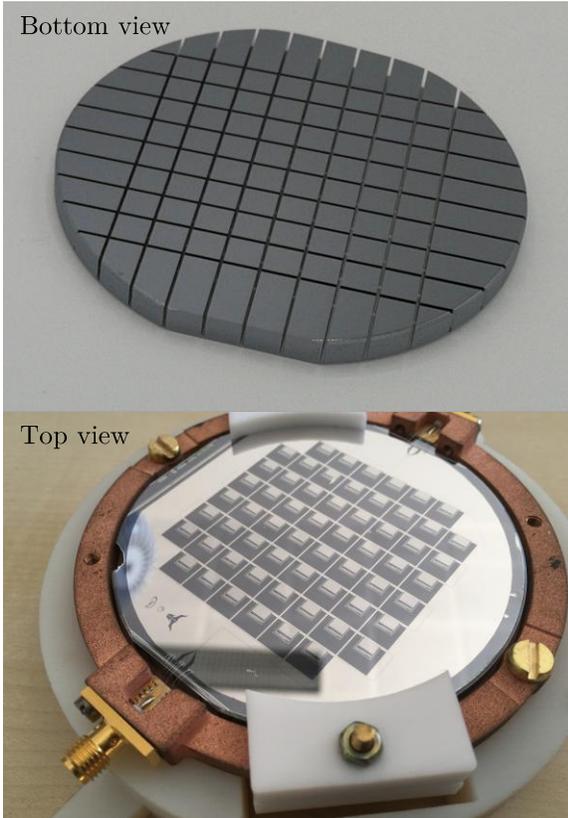
Idea di base

Rilevare i **fononi** prodotti dalle interazioni delle particelle in un bersaglio rilevato da rivelatori **KIDs**

- Wafer monolitico di **silicio** :
 - Intagliato in dadi da $5 \times 5 \times 4.5 \text{ mm}^3$
 - 0.3 g per dado
 - Base comune da 0.5 mm



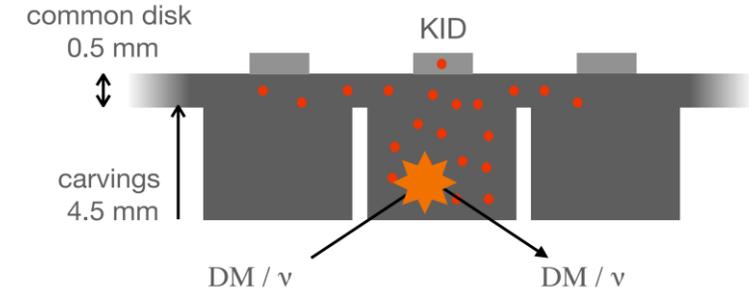
Il progetto BULLKID



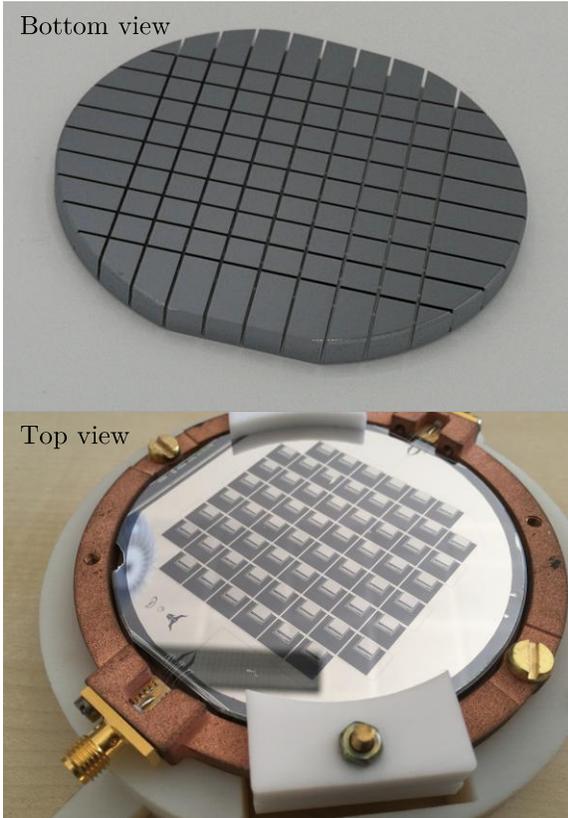
Idea di base

Rilevare i **fononi** prodotti dalle interazioni delle particelle in un bersaglio rilevato da rivelatori **KIDs**

- Wafer monolitico di **silicio** :
 - Intagliato in dadi da $5 \times 5 \times 4.5 \text{ mm}^3$
 - 0.3 g per dado
 - Base comune da 0.5 mm
- 60 **KIDs** array:
 - Film di alluminio da 60 nm
 - 1 KID per ogni dado
 - **Singola** linea di lettura



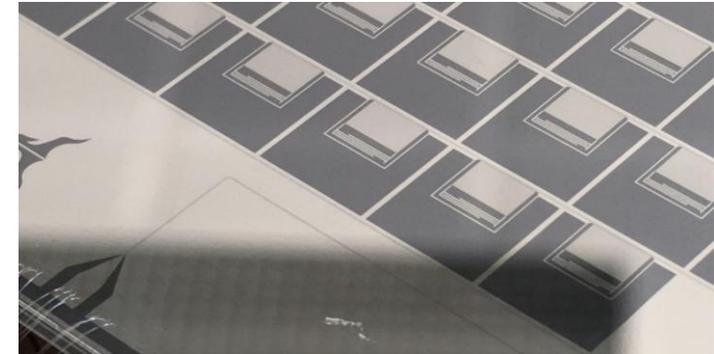
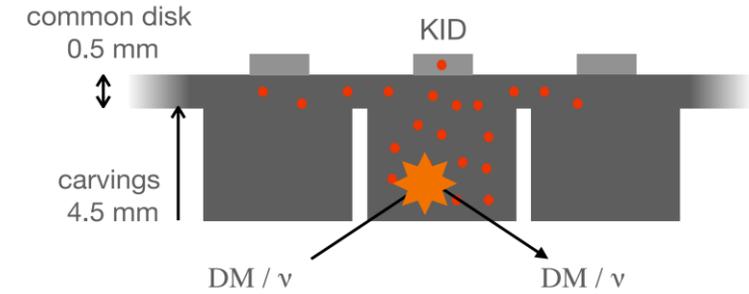
Il progetto BULLKID



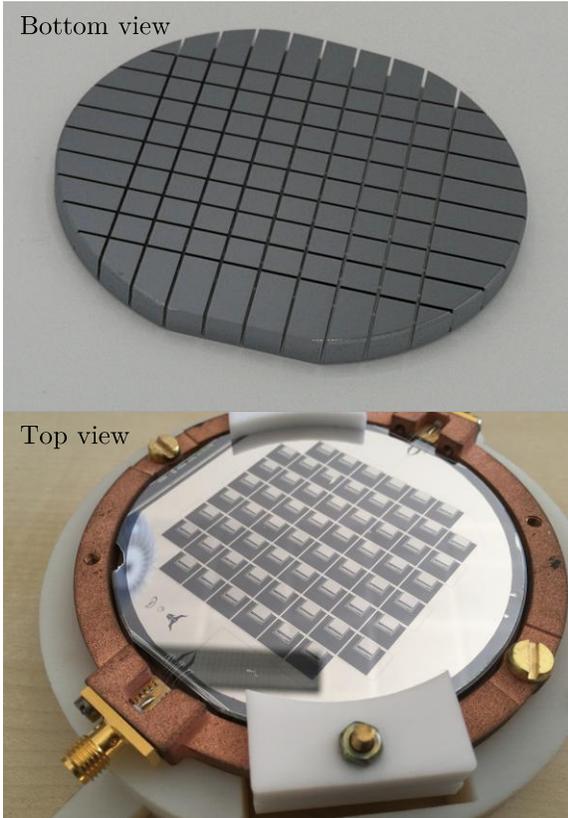
Idea di base

Rilevare i **fononi** prodotti dalle interazioni delle particelle in un bersaglio rilevato da rivelatori **KIDs**

- Wafer monolitico di **silicio** :
 - Intagliato in dadi da $5 \times 5 \times 4.5 \text{ mm}^3$
 - 0.3 g per dado
 - Base comune da 0.5 mm
- 60 **KIDs** array:
 - Film di alluminio da 60 nm
 - 1 KID per ogni dado
 - **Singola** linea di lettura



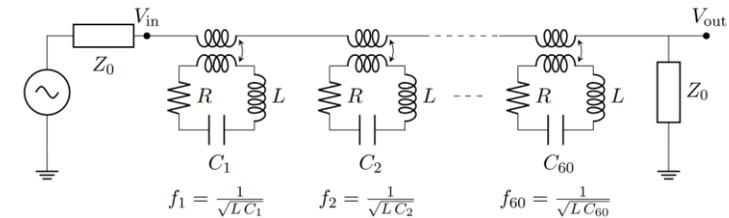
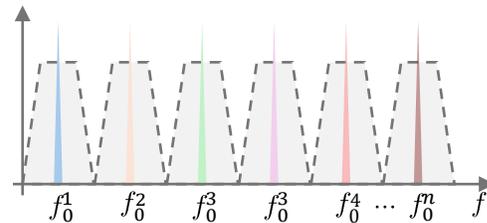
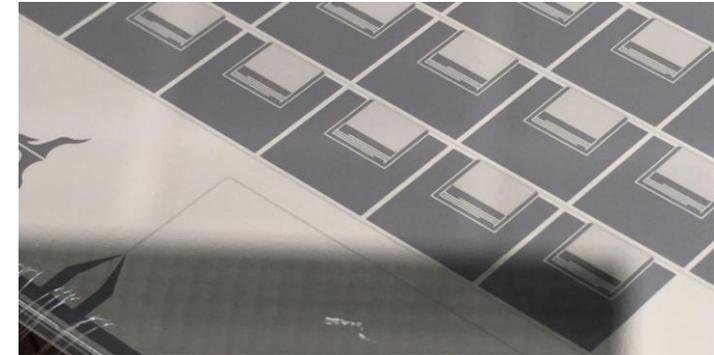
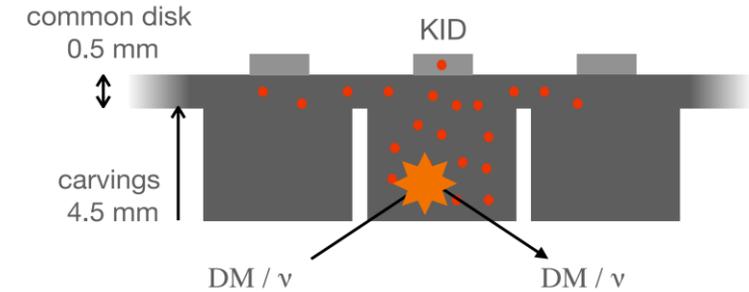
Il progetto BULLKID



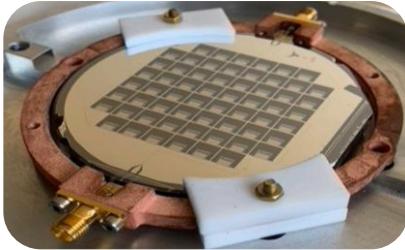
Idea di base

Rilevare i **fononi** prodotti dalle interazioni delle particelle in un bersaglio rilevato da rivelatori **KIDs**

- Wafer monolitico di **silicio** :
 - Intagliato in dadi da $5 \times 5 \times 4.5 \text{ mm}^3$
 - 0.3 g per dado
 - Base comune da 0.5 mm
- 60 **KIDs** array:
 - Film di alluminio da 60 nm
 - 1 KID per ogni dado
 - **Singola** linea di lettura



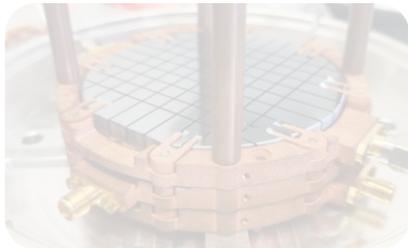
Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

2

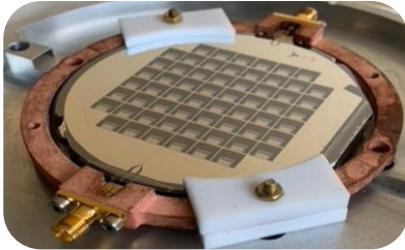


R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3

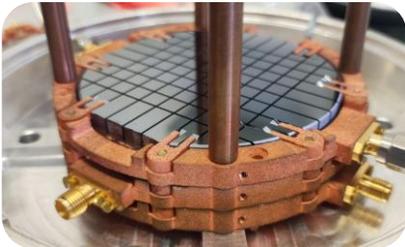
Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

2

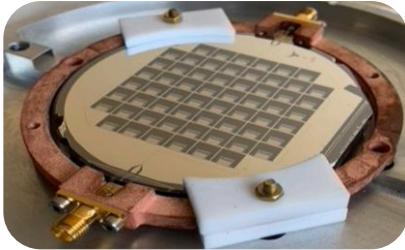


R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3

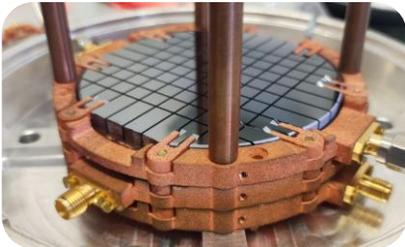
Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

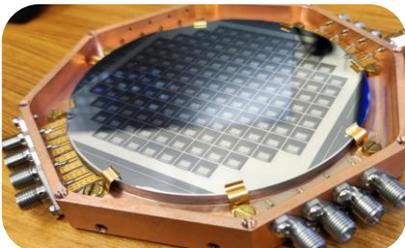
1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

2

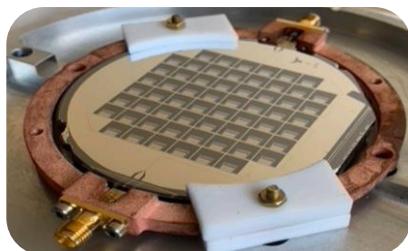


R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3

Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

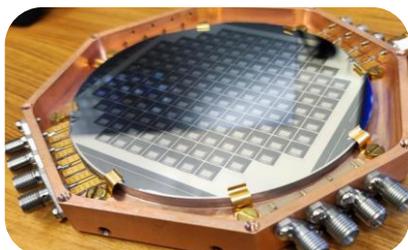
1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

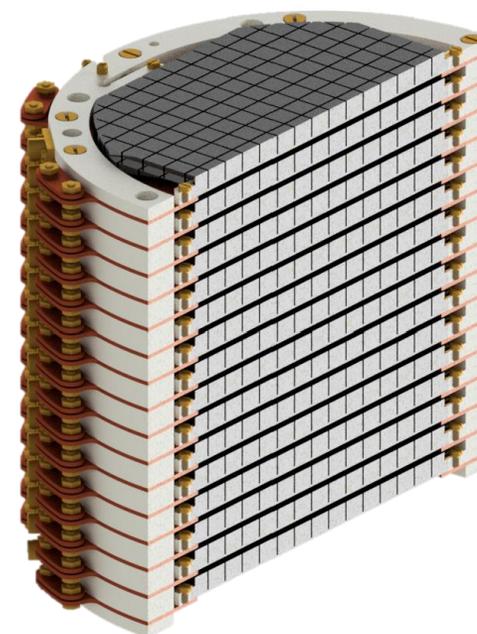
2



R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3

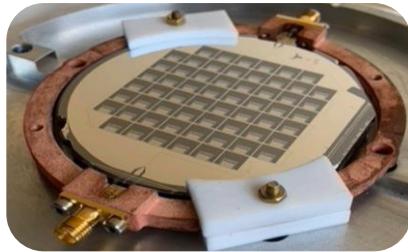


BULLKID-DM - 600 g / 2500 dadi

Stack di 16 wafer da 100 mm
Messa in funzione @ Sapienza
2026

4

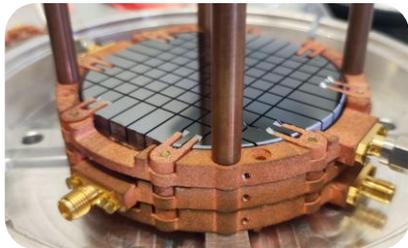
Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

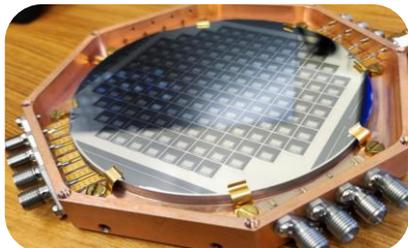
1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

2



R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3

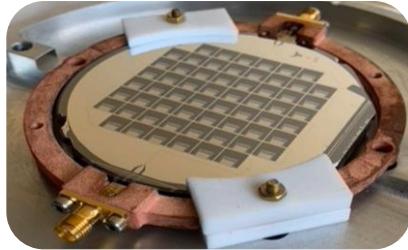


BULLKID-DM - 600 g / 2500 dadi

Stack di 16 wafer da 100 mm
Messa in funzione @ Sapienza
2026

4

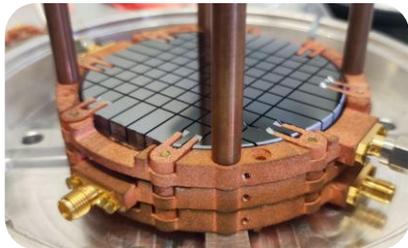
Timeline di BULLKID-DM



Prototipo - 20 g / 60 dadi

Singolo wafer 3"
Concluso nel 2023

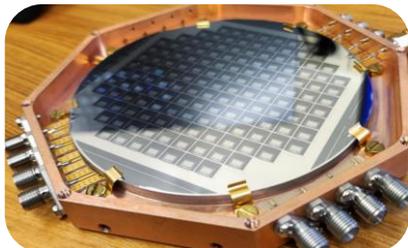
1



Dimostratore - 60 g / 180 dadi

Stack di 3 wafer da 3"
Primi test estate 2024

2



R&D 100 mm 50 g / 145 dadi

Singolo wafer 100 mm
Primi test autunno 2024

3



Caratteristiche

- Volume totalmente attivo
- Fiducializzazione

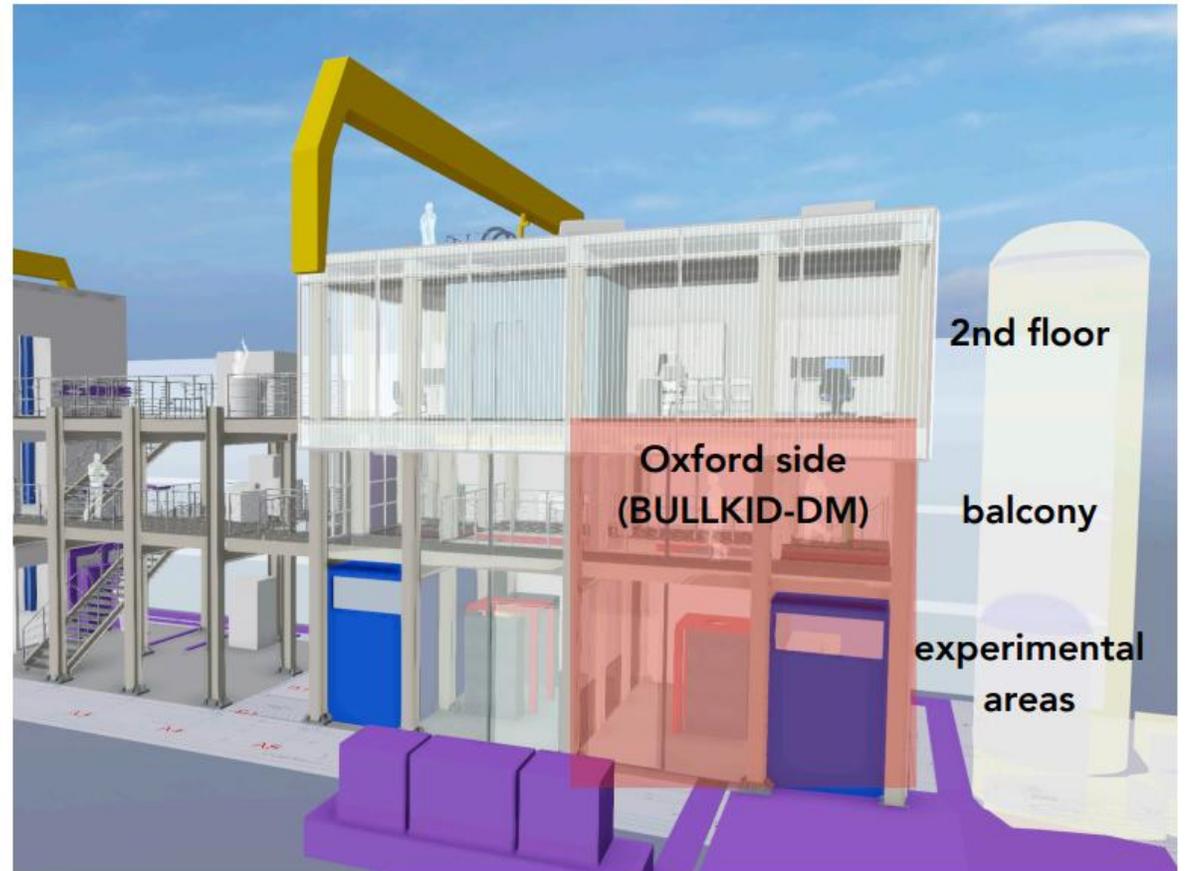
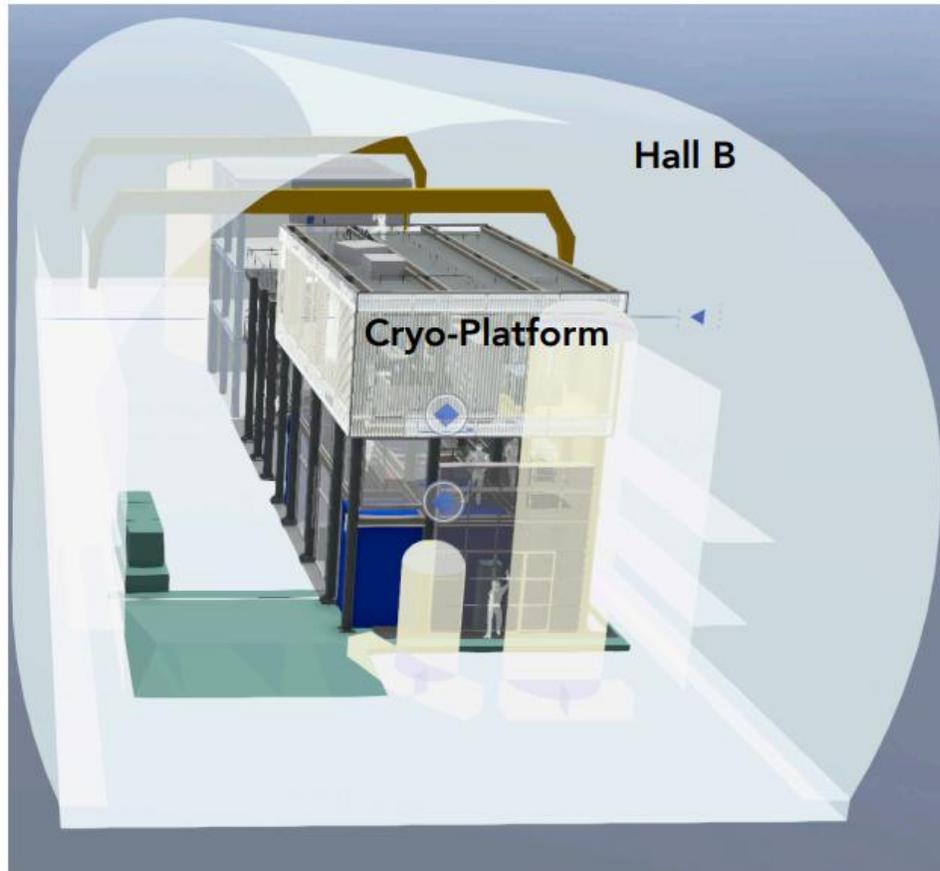
BULLKID-DM - 600 g / 2500 dadi

Stack di 16 wafer da 100 mm
Messa in funzione @ Sapienza
2026

4

BULLKID @ LNGS

Cryo-Facility



BULLKID @ LNGS

Cryo-Facility (Early 2025)



10 Apr 2025



D. Quaranta BULLKID-DM

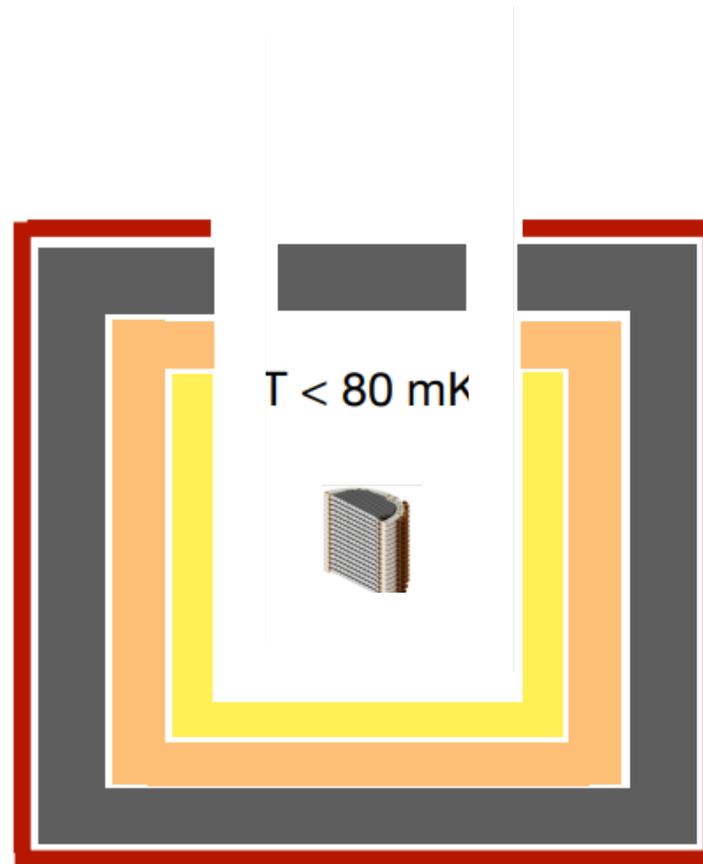
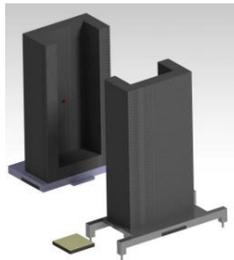
10

BULLKID @ LNGS

Schermi & Veto

Schermi T Ambiente

- Lead γ -Shield
- Cu Shield
- PE n-shield

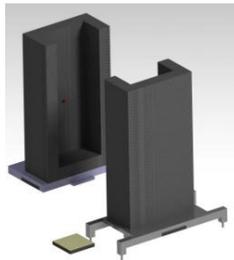


BULLKID @ LNGS

Schermi & Veto

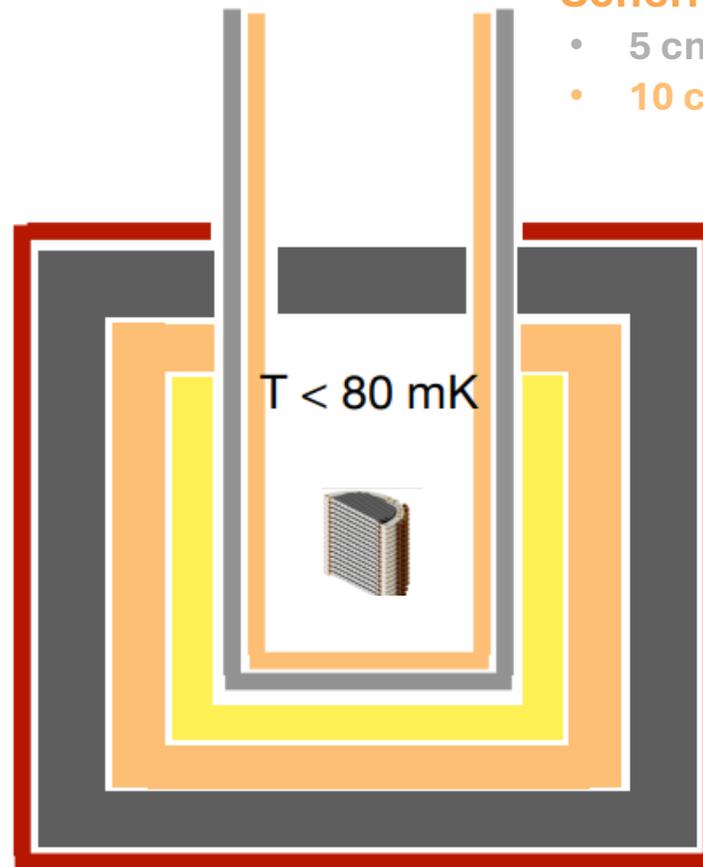
Schermi T Ambiente

- Lead γ -Shield
- Cu Shield
- PE n-shield



Schermi Aggiuntivi

- 5 cm Lead shield
- 10 cm Copper shield

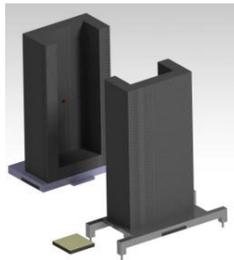


BULLKID @ LNGS

Schermi & Veto

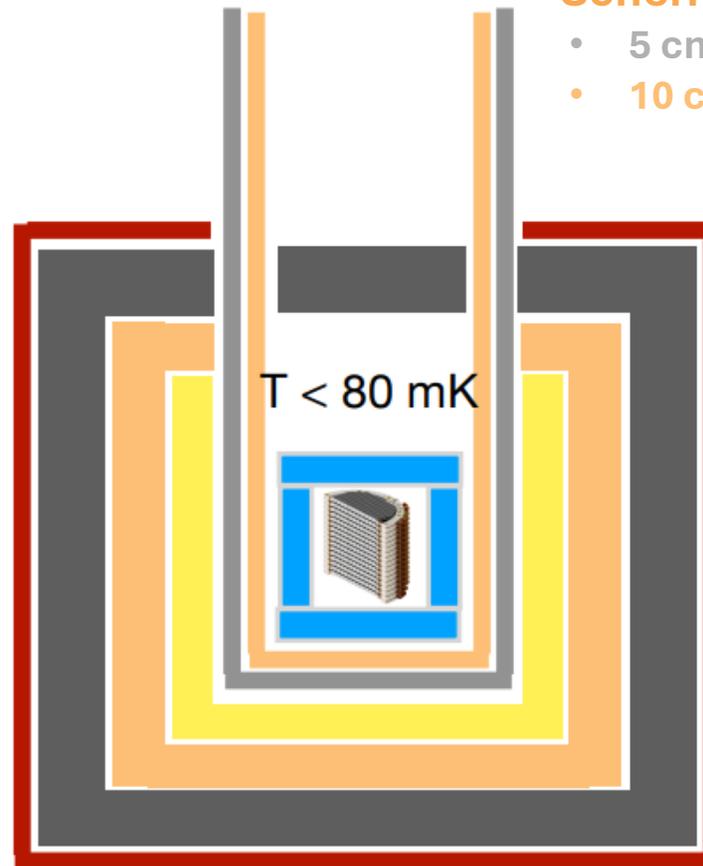
Schermi T Ambiente

- Lead γ -Shield
- Cu Shield
- PE n-shield



Schermi Aggiuntivi

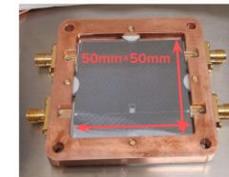
- 5 cm Lead shield
- 10 cm Copper shield



Cryo-scherma/veto

- BGO crystal
- KID light detector

CALDER KID Light detector

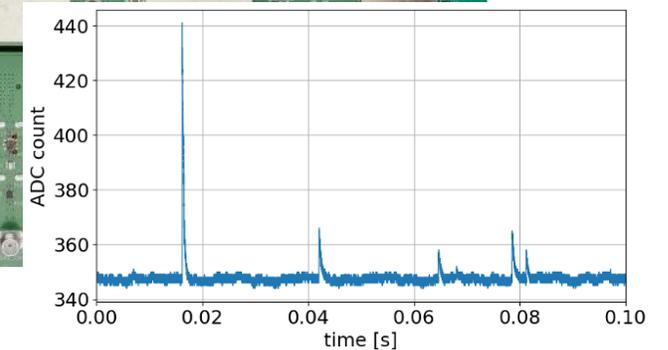
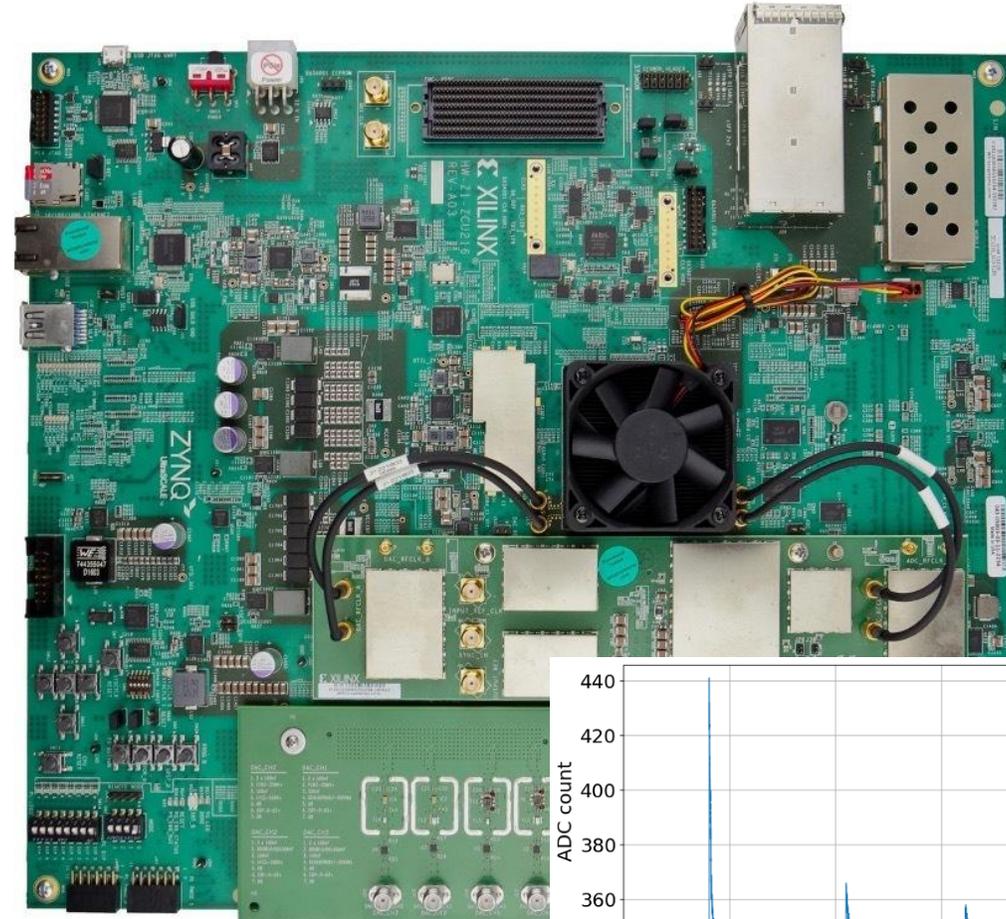


BGO Crystal



Elettronica

- **Elettronica Precedente**
 - Ettus x310
 - 30 KIDs / linea
- **Nuova Elettronica (KIT group)**
 - ZCU216 Evaluation Board
 - 150 KIDs / linea
 - 16 linee

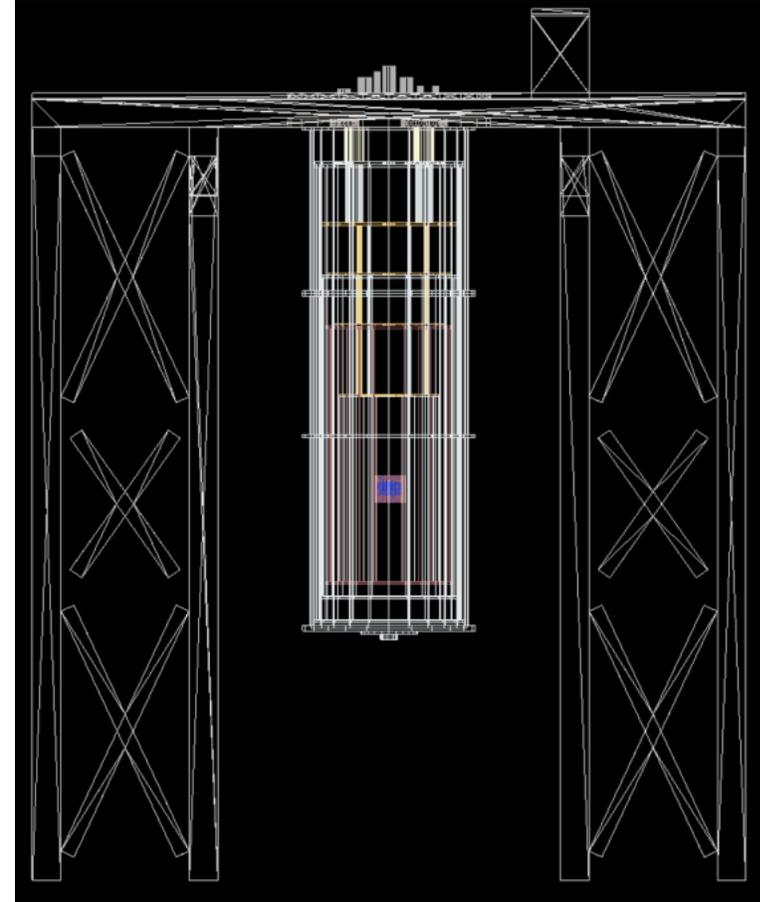


Simulazioni MonteCarlo

Sapienza Setup

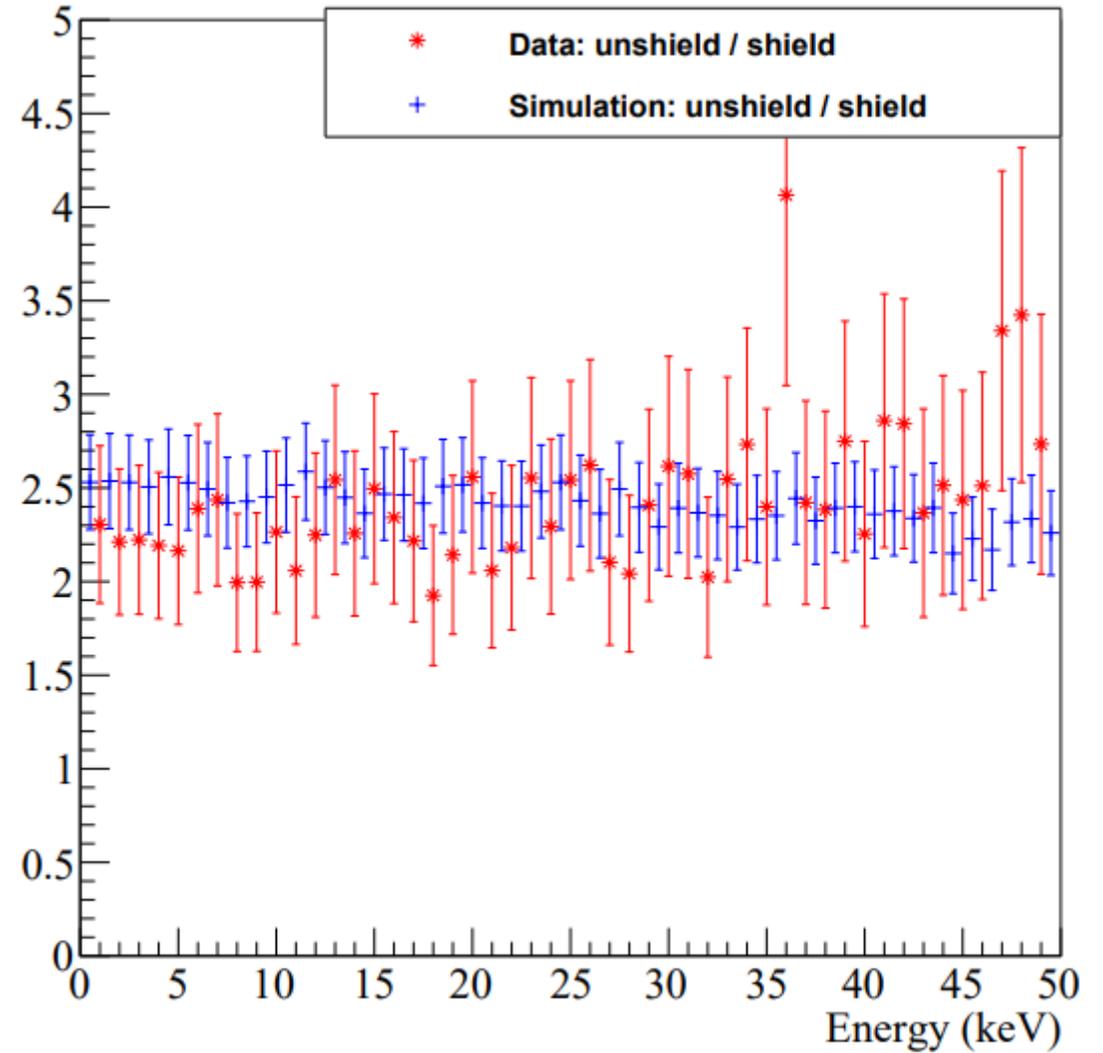


Gran Sasso Setup



Simulazioni MonteCarlo

Sapienza Setup



La Collaborazione BULLKID-DM

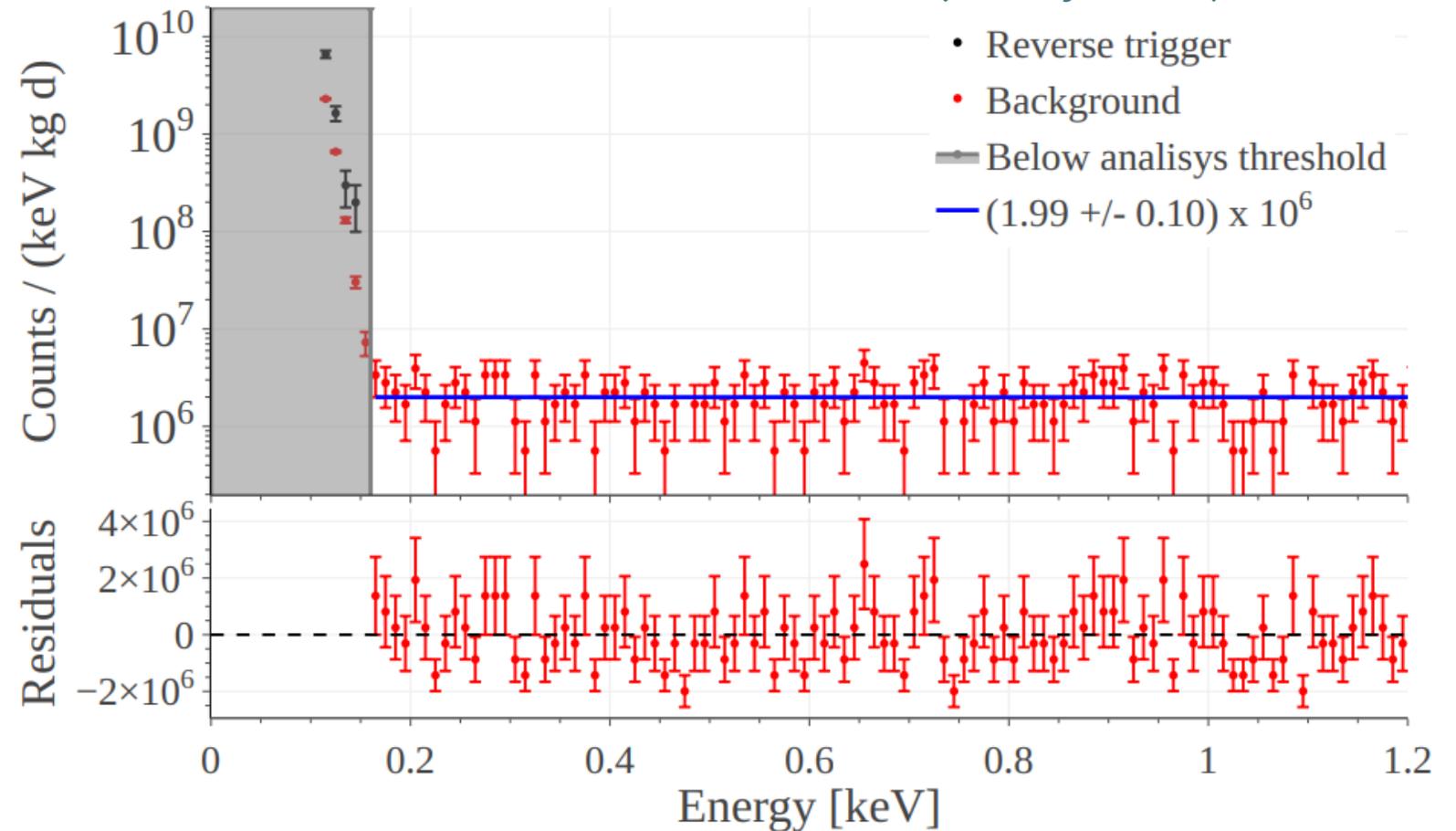
Our last collaboration meeting in Pisa in Jan. 2025



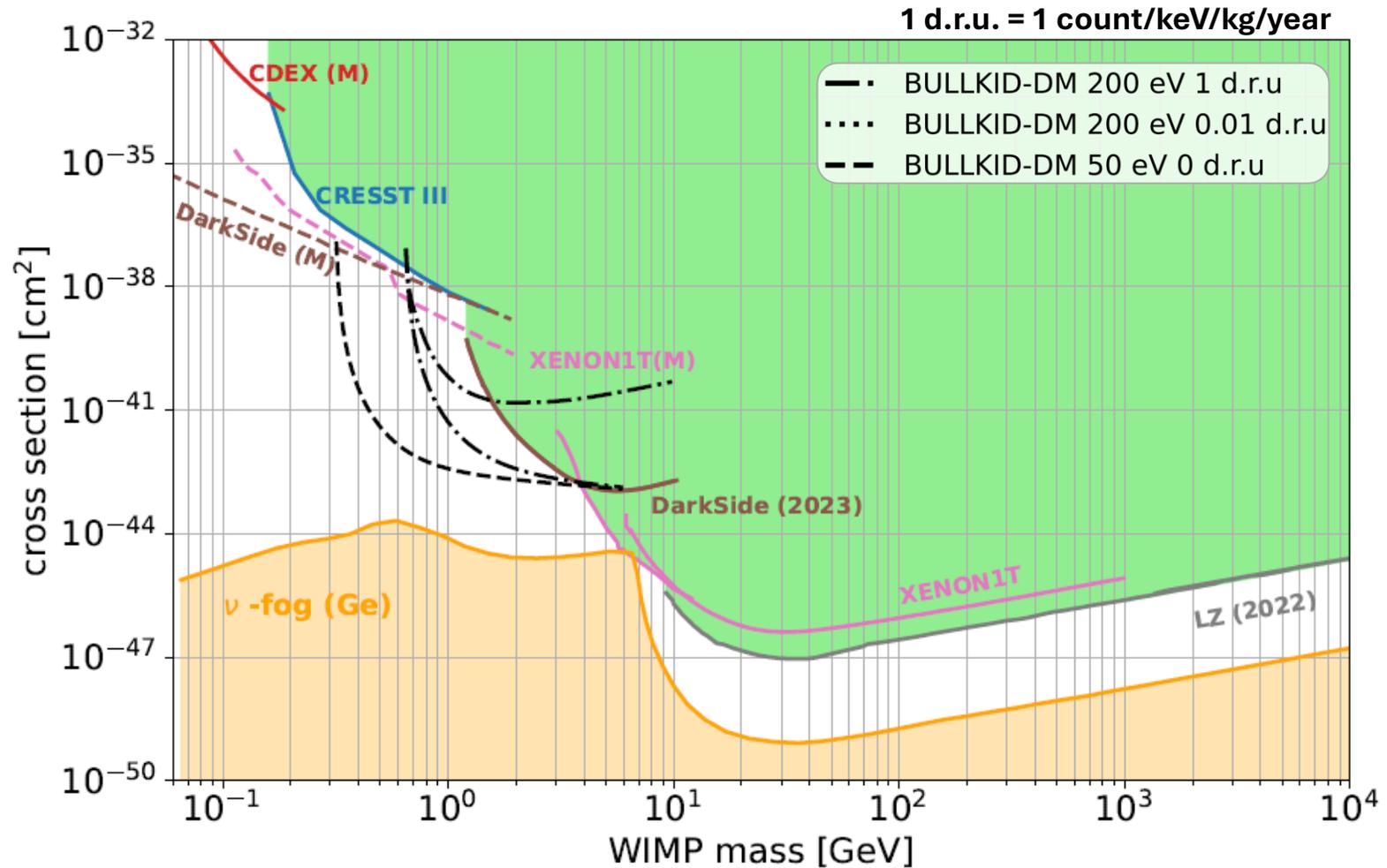
Background @ Sapienza

- Spettro di energia dopo 39 ore di esposizione di un singolo dado da 0,34 g a condizioni ambientali di fondo

D. Delicato et al, Eur. Phys. J. C 84, 353 (2024)



Proiezioni di sensitività



Grazie per l'attenzione

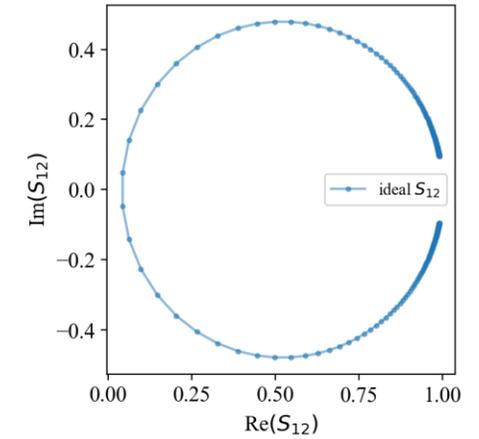
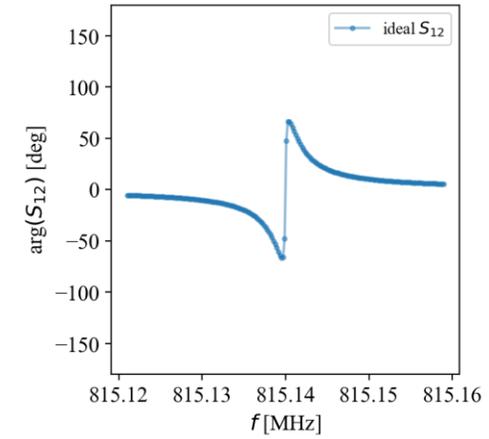
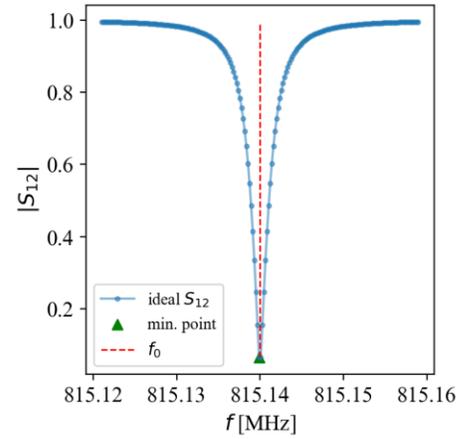
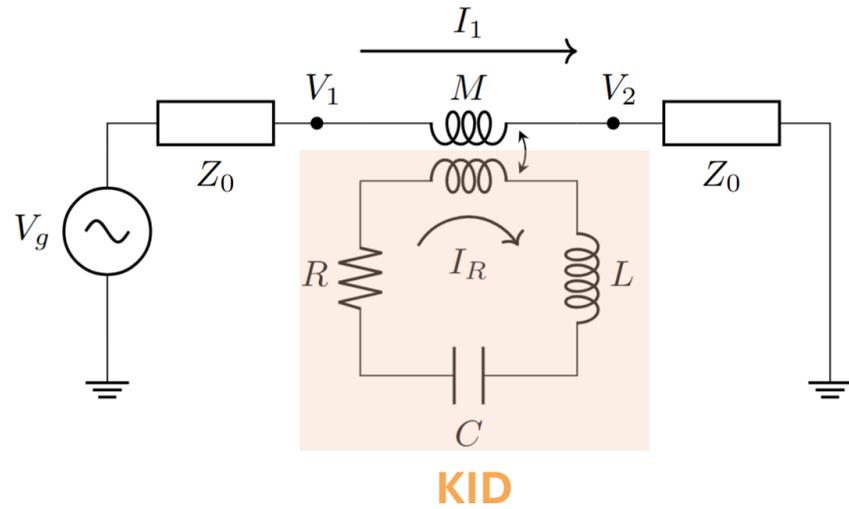
*This work was partially supported through the European Research Council through the Consolidator Grant **DANAE** number 101087663





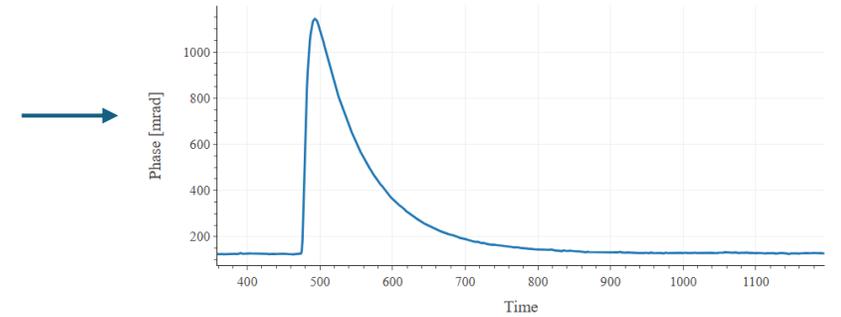
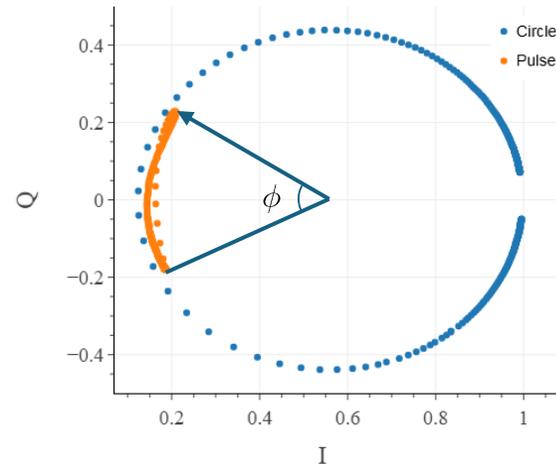
Backup Slides

KIDs Readout



Funzione di trasmissione

$$S_{21}(\omega) = 1 - \frac{Q}{Q_c} \frac{1}{1 + 2jQx}$$



Calibrazione

- Il dado in esame viene eccitato con impulsi LED di energia crescente.

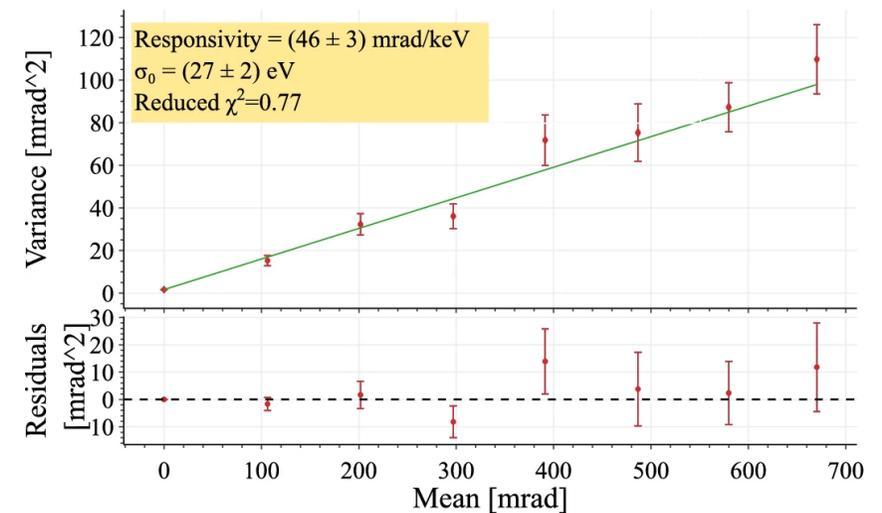
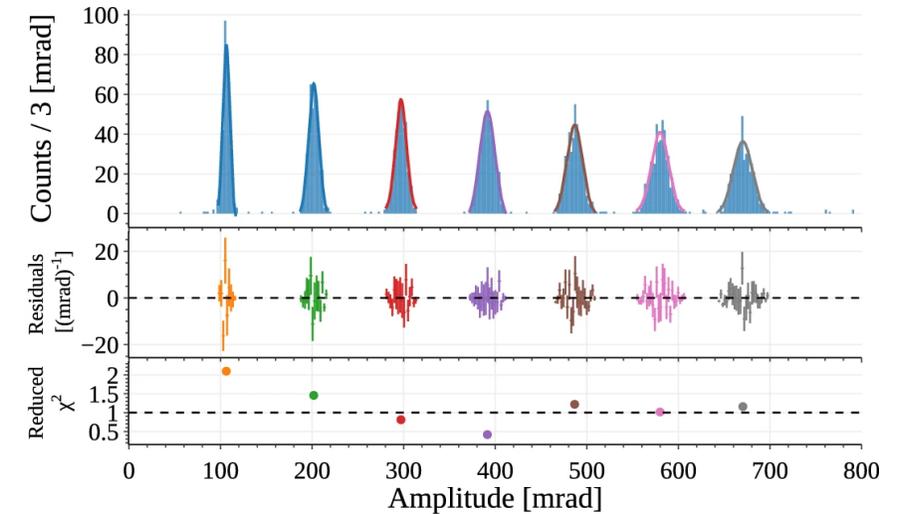
- Per la statistica di Poisson

$$\mu = k \cdot N_{ph} \quad \sigma^2 = k \cdot N_{ph} + \sigma_0^2$$

- Introducendo la responsività R:

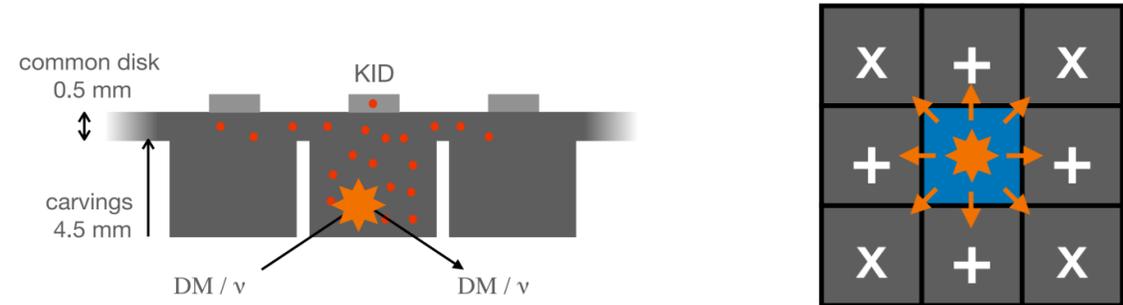
$$R = k/\epsilon_{ph} \quad [\text{mrad/keV}] \quad \longrightarrow \quad \sigma^2 = R \cdot \mu + \sigma_0^2$$

- R and σ_0 estratte tramite fit lineare



Phonon Leakage

- Metà dei fononi prodotti in un dado sfugge verso dadi vicini
 - $(14 \pm 3) \%$ in ogni cubo “+”
 - $(5 \pm 1) \%$ in ogni “x”



- Questo effetto riduce l'efficienza di raccolta dei fononi
- Ma permette di identificare il dado dove è avvenuta l'interazione

