
CALIPSO

*CAlorimetry at Low temperatures with ImProved
Scintillation and Optimized time resolution*

Irene Nutini

Università degli Studi Milano Bicocca

INFN Milano Bicocca



Indice e punti chiave

- Calorimetri criogenici nella fisica astro-particellare e nucleare
 - Motivazione del progetto CALIPSO
- Il progetto CALIPSO
 - WP 1 - Sensoristica e readout
 - WP 2 - Cristalli scintillanti
 - WP 3 - Misure sperimentali
 - Organizzazione delle attività
- Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Calorimetri criogenici nella fisica astro-particellare e nucleare

Rivelatori a stato solido a bassa temperatura - Calorimetri criogenici

Energia depositata → termalizzata in
assorbitore cristallino (**fononi termici**)

→ variazione di temperatura $\Delta T = E/C$

- Criogenia al mK: **T ~ 10-50 mK** - piccola C

- Assorbitore: scelta flessibile e ampia

⇒ **Macro-calorimetri:**

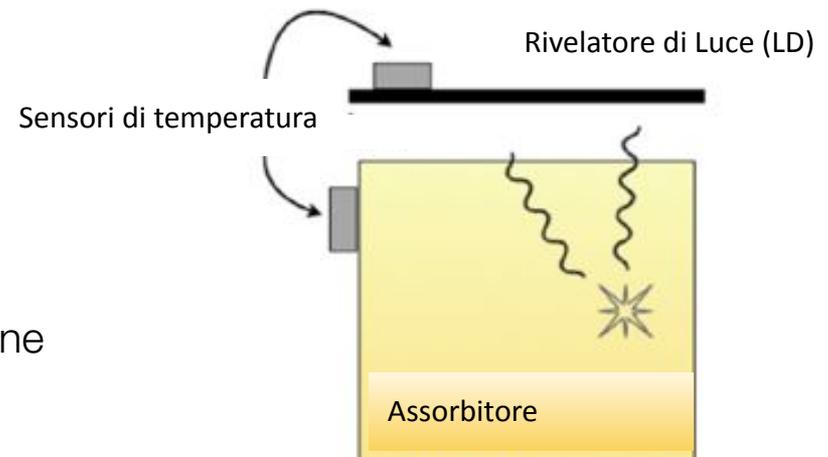
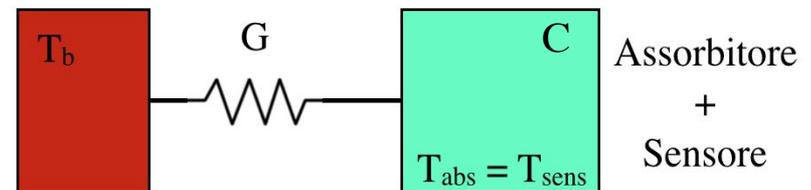
massa ~10-100g, dinamica 30 eV-10 MeV,

$\Delta E/E \sim 0.2\%$

Doppia lettura: calore + scintillazione

- Rapporto luce/calore ⇒ PID
- Lettura luce di scintillazione con calorimetro criogenico a minore C ⇒ (migliore) informazione temporale

Bagno termico



Calorimetri criogenici nella fisica astro-particellare e nucleare

Sensori di temperatura per calorimetri criogenici

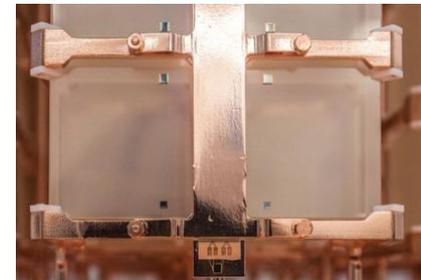
Sensori accoppiati ad assorbitore.

Raccolta fononi assorbitore \Rightarrow conversione in segnale elettrico

Termistori a semiconduttore

- Forte variazione di resistenza al variare di T
- Ge - Neutron Transmutation Doping (**Ge-NTD**)
- Sensibili su **ampio range di temperature** (10-50 mK)
- Alta impedenza (10-100 Mohm): elettronica standard
- **Ottima riproducibilità su larga scala (> 1000 chip) e uniformità prestazioni**

Ge-NTD
3x3x1 mm³



Esperimento
CUORE:
988 cristalli
ognuno con un
Ge-NTD

Altri sensori: **TES, MMC, KIDs** \rightarrow alto guadagno, sensori più veloci, **tecnologia complessa per produzione e operazione dei sensori**

Calorimetri criogenici nella fisica astro-particellare e nucleare

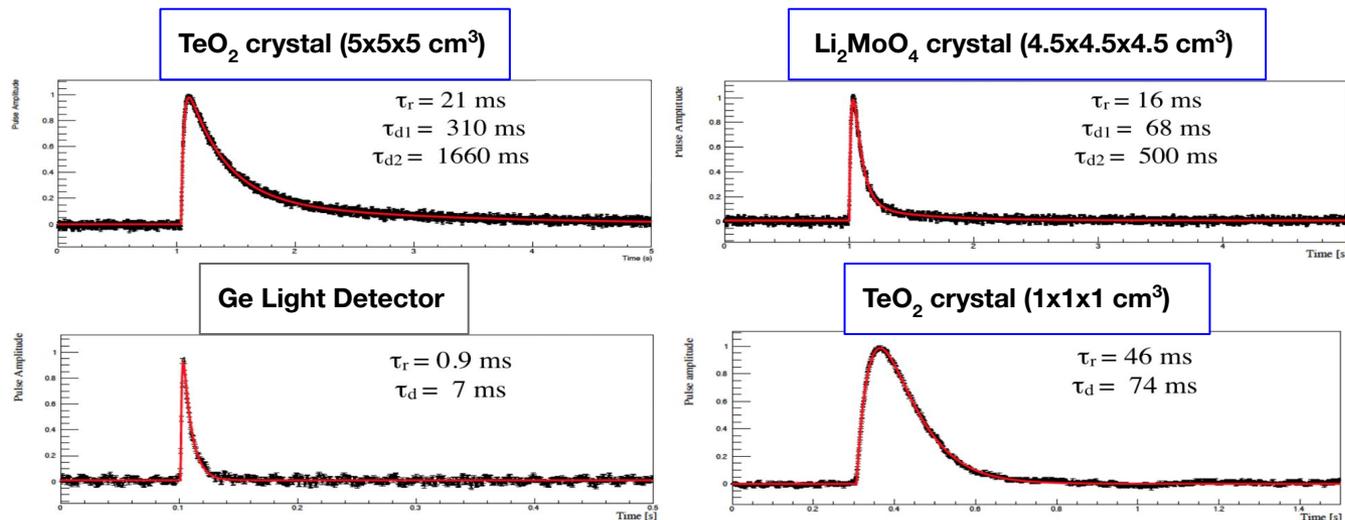
Calorimetri con sensore NTD: limitati nella velocità di risposta

Risposta temporale complessa:

- Salita esponenziale (non istantanea)
- Costanti di decadimento multiple

→ Limiti attuali di **risoluzione temporale**: $\delta t \sim 1$ ms

- I. **Accoppiamento** NTD-assorbitore e cap. termica NTD
- II. Scelta **bias** NTD
- III. Meccanismi di rilascio ritardato di energia
- IV. RC fili di lettura



<https://arxiv.org/pdf/2101.05029.pdf>

Motivazione del progetto CALIPSO

Una **limitata risoluzione temporale** può avere un impatto non trascurabile sulla **sensibilità di esperimenti** che utilizzano la tecnologia dei **macro-calorimetri criogenici**

Ricerca del decadimento $\beta\beta$ senza emissione di neutrini

[Esp. CSN2 INFN - CUORE, CUPID - e in ambito internazionale]

Calorimetri criogenici:

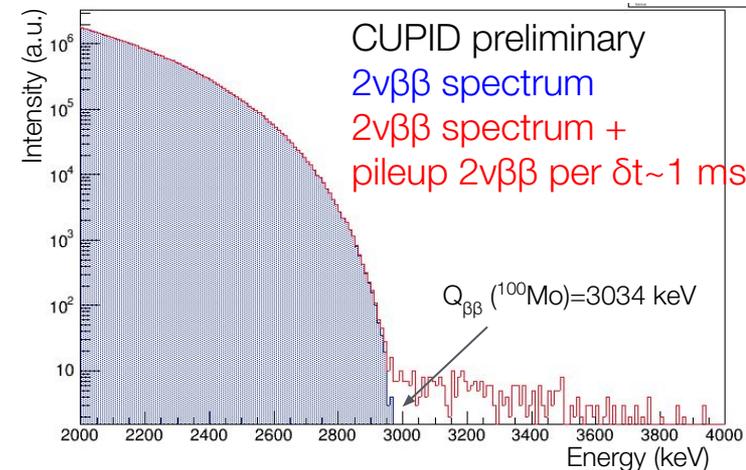
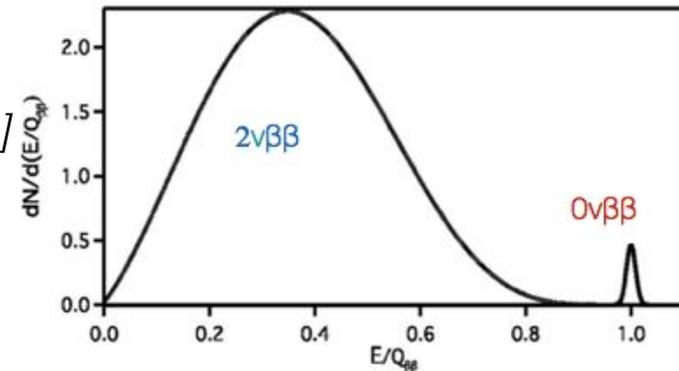
sorgente $\beta\beta$ = assorbitore = rivelatore + ottima $\Delta E/E$

CUPID (Li_2MoO_4 , Ge-LD + NTD: **1 ton / 1500 riv.**)

utilizzo **calorimetri scintillanti arricchiti in isotopo $\beta\beta$**

→ fondo: **Pileup accidentale tra eventi $2\nu\beta\beta$** a $Q_{\beta\beta}$

<https://arxiv.org/pdf/1907.09376.pdf>



Il progetto CALIPSO

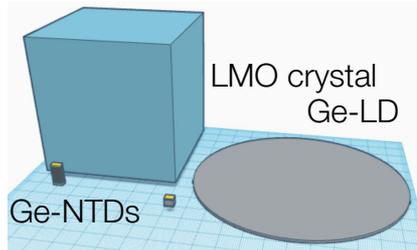
CALIPSO

CALorimetry at Low temperatures with ImProved Scintillation and Optimized time resolution

Motivazione: Superare i limiti in velocità di risposta (~ 1 ms) delle attuali implementazioni dei **rivelatori criogenici scintillanti con lettura a NTD**

Obiettivo: Realizzazione di un prototipo di macro-calorimetro criogenico scintillante con sensori NTD, con **risoluzione temporale $\delta t < 0.05$ ms** e **risoluzione energetica $\sim 0.2\%$**

Il progetto CALIPSO



Rivelatore
composito

Cristalli Li_2MoO_4 ($\sim 2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$) e rivelatori di luce in Ge, entrambi con readout NTD

Tecnologie e
tecniche innovative

Nuove strategie: accoppiamenti NTD-assorbitore, scintillazione dei cristalli

Misure sperimentali

Caratterizzazione della scintillazione e delle prestazioni criogeniche (forma del segnale, resa in luce, SNR)

Obiettivo

Realizzazione di prototipo con risoluzione temporale $\delta t < 0.05 \text{ ms}$ e risoluzione energetica $\sim 0.2\%$

Filiera per nuova tecnologia applicabile anche ad altri cristalli

Modelli termici per calorimetri criogenici

Workpackages del progetto del rivelatore per CALIPSO

WP 1: Sensoristica e readout

WP 1(a) Nuovi accoppiamenti NTD-rivelatore

Lettura segnale termico con singolo NTD
→ Migliori accoppiamenti termici per **limitare** introduzione di **costanti di tempo spurie**

WP 1(b) Aggiunta di un secondo NTD per il readout

NTD_1 std op. - alto SNR
→ misura di Energia
NTD_2 **alto bias** - impulsi più veloci → **informazione temporale**
[Risk mitigation strategy]

WP 2: Drogaggio del cristallo scintillante

Aumento della resa in luce, anche a $T \sim 10$ mK
→ **miglioramento del timing** di segnale di luce

WP 3: Misure sperimentali

Team progetto CALIPSO

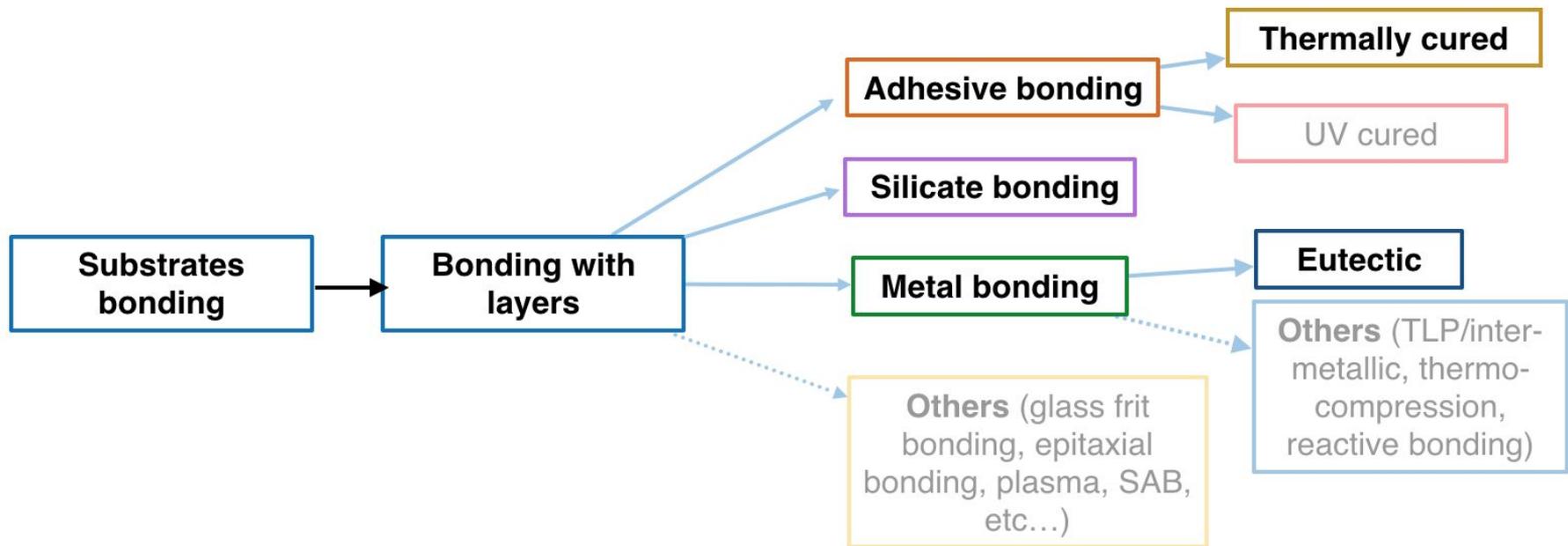
Gruppo di ricerca	Istituzione	Competenze e attività
<i>Dott.sa Irene Nutini</i>	INFN MiB - Fisica	Sviluppo e caratterizzazione dei calorimetri criogenici: design, performance, radio-purezza (WP 1, WP 3)
Dott. Matteo Biassoni		
Dott.sa Elena Ferri		
Dott. Luca Gironi		
Prof. Fabio Bellini	INFN Roma 1	
Dott.sa Francesca Cova	INFN MiB - Scienza dei Materiali	Progettazione del drogante e caratterizzazione della scintillazione (WP 2, WP 3)
Prof. Mauro Fasoli		

Collaborazione scientifica per l'attività del progetto:

- Crescita dei cristalli: Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry - Laboratory of crystal growing, Dott. V. N. Shlegel
- Sensoristica - nuovi accoppiamenti: INFN Ferrara, Dott. A. Mazzolari

CALIPSO WP 1: Sensoristica e readout

WP 1(a): Accoppiamenti tra substrati (es. assorbitore/NTD)



CALIPSO WP 1(a)

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio tradizionale

Adhesive bonding

Incollaggio NTD su cristallo con colle/resine

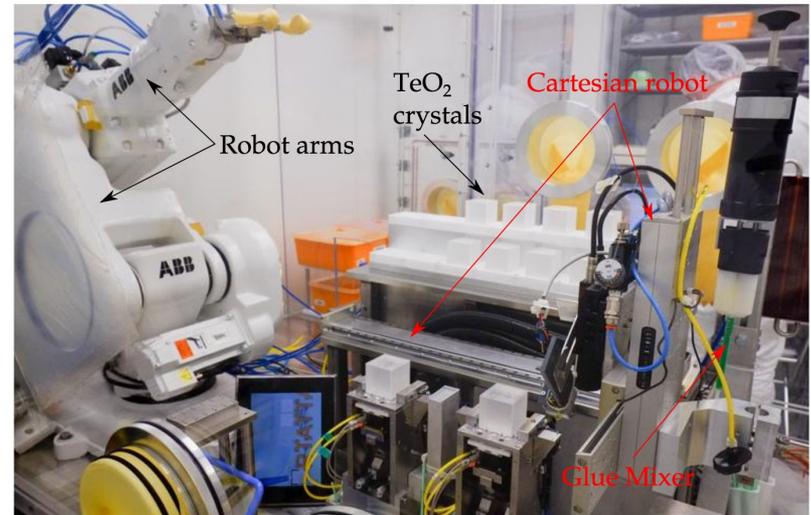
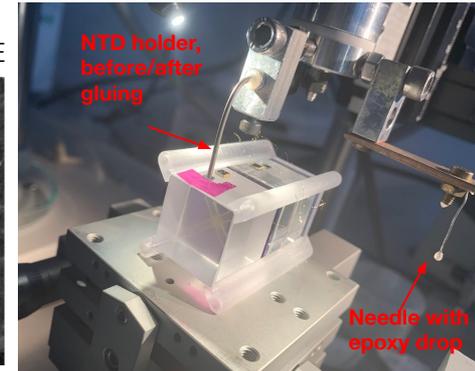
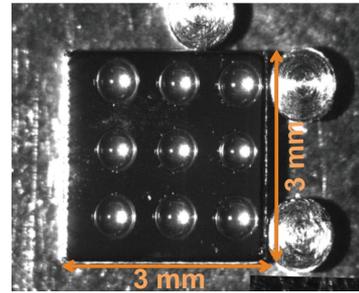
Approccio utilizzato negli ultimi 25-30 anni

Velo di colla \Rightarrow spots multipli

Strumenti automatici per incollaggi precisi e
riproducibili per centinaia/migliaia di sensori

\rightarrow Minore variabilità forma segnale, ma risoluzione
temporale limitata

Glue spots on NTD for CUORE



CUORE gluing robot

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/11/07/P07009>

CALIPSO WP 1(a)

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (1)

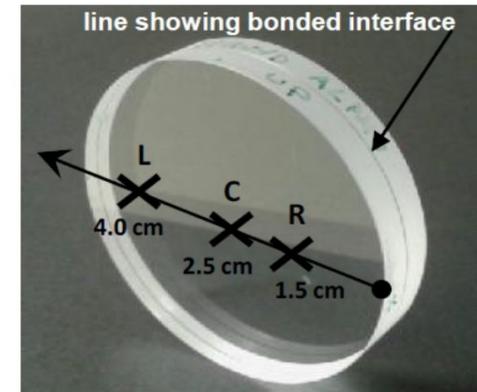
Silicate bonding

Tecnica sviluppata per applicazioni astronomiche da circa 20 anni. Soluzione di idrossido in acqua per formare un legame chimico tra ossidi o materiali facilmente ossidabili.

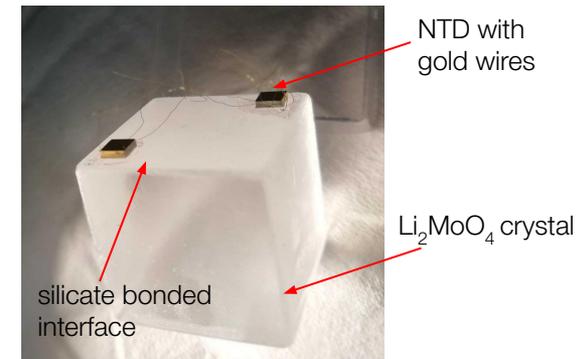
→ Silicate bonding per CALIPSO

Sospensione di nanoparticelle di silicato di sodio ($(\text{Na}_2\text{O})_x \cdot (\text{SiO}_2)_y$) per accoppiamento Ge-NTD su cristalli e LDs.

- Rugosità superfici (ottimale $< 10\text{nm}$)
- Effetto di utilizzo di 'gocce di soluzione acquosa' su superfici di cristalli igroscopici (es. Li_2MoO_4)
- Test forza e conduttanza del bonding a $T \sim 10\text{ mK}$



Silicate bonding: due substrati SiO_2 - VIRGO



Primo test silicate bonding:
Ge-NTD / Li_2MoO_4
(realizzato in collab. con INFN Ferrara)

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (2)

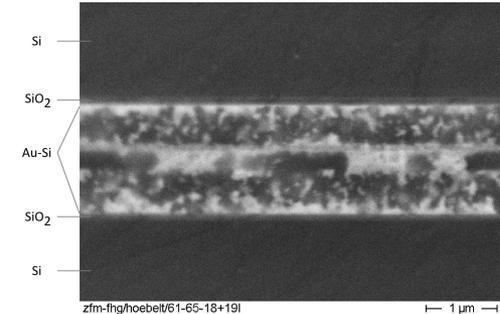
Eutectic bonding

Leghe eutettiche utilizzate per incollaggio di wafer (Si) in fabbricazione semiconduttori.

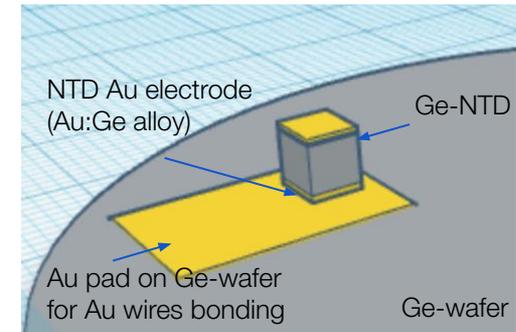
→ Eutectic bonding per CALIPSO

Legga eutettica Au-Ge dell'elettrodo del NTD su substrato Ge (LD) o su ossido (cristalli)

- Effetti di outgassing alla superficie dei cristalli o stress termici post riscaldamento ($\sim 150\text{-}300^\circ\text{C}$) e pressione
- Stabilità e proprietà delle giunzioni eutettiche NTD-rivelatori a basse temperature (fino a 10 mK)



Sezione di un bonding eutettico Au-Si tra due substrati in Si

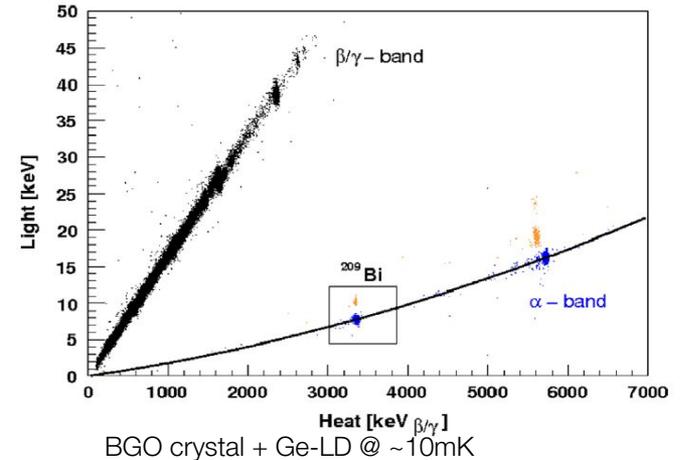


Schema realizzazione eutectic bonding: Ge-NTD / Ge-wafer

CALIPSO WP 2: Cristalli scintillanti

Cristalli criogenici scintillanti per fisica degli eventi rari

Numerosi composti (Li_2MoO_4 , ZnSe , NaI , CdWO_4 ,...) ma **resa in luce molto bassa**



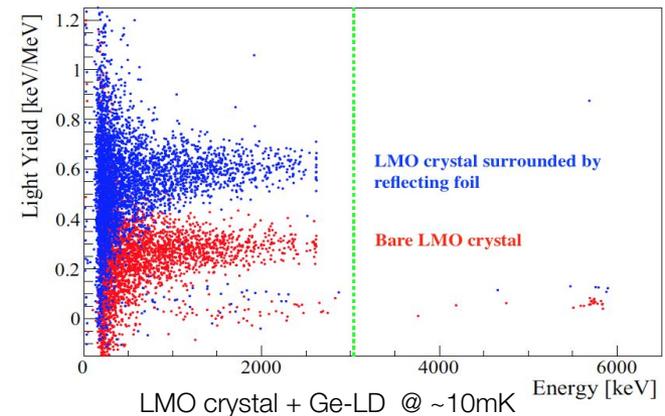
Ottimizzazione dell'informazione dalla scintillazione

Aumento di SNR e efficienza dei LD

approccio tradizionale

Drogaggio dei cristalli

approccio alternativo



<https://doi.org/10.1140/epic/s10052-020-08809-8>

CALIPSO WP 2

Ottimizzazione della scintillazione: approccio alternativo

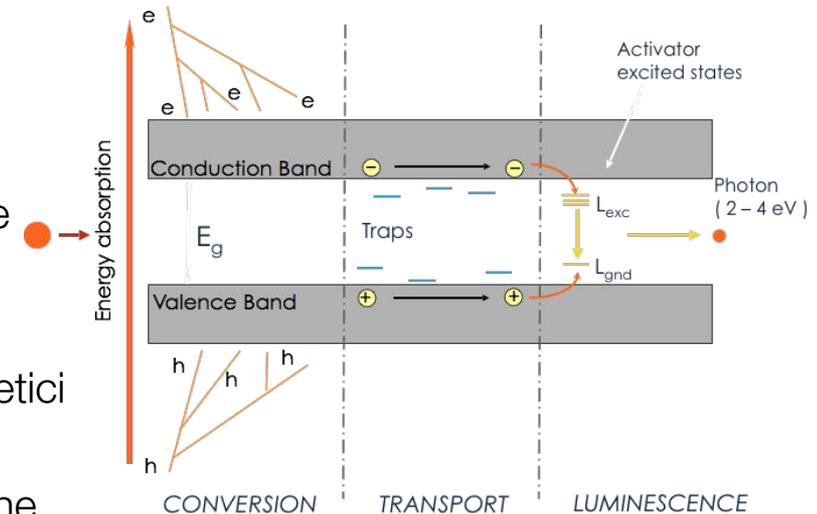
Drogaggio dei cristalli con centri attivatori

→ aumento della resa in luce del cristallo stesso, anche a bassa T

Scelta dello ione drogante per

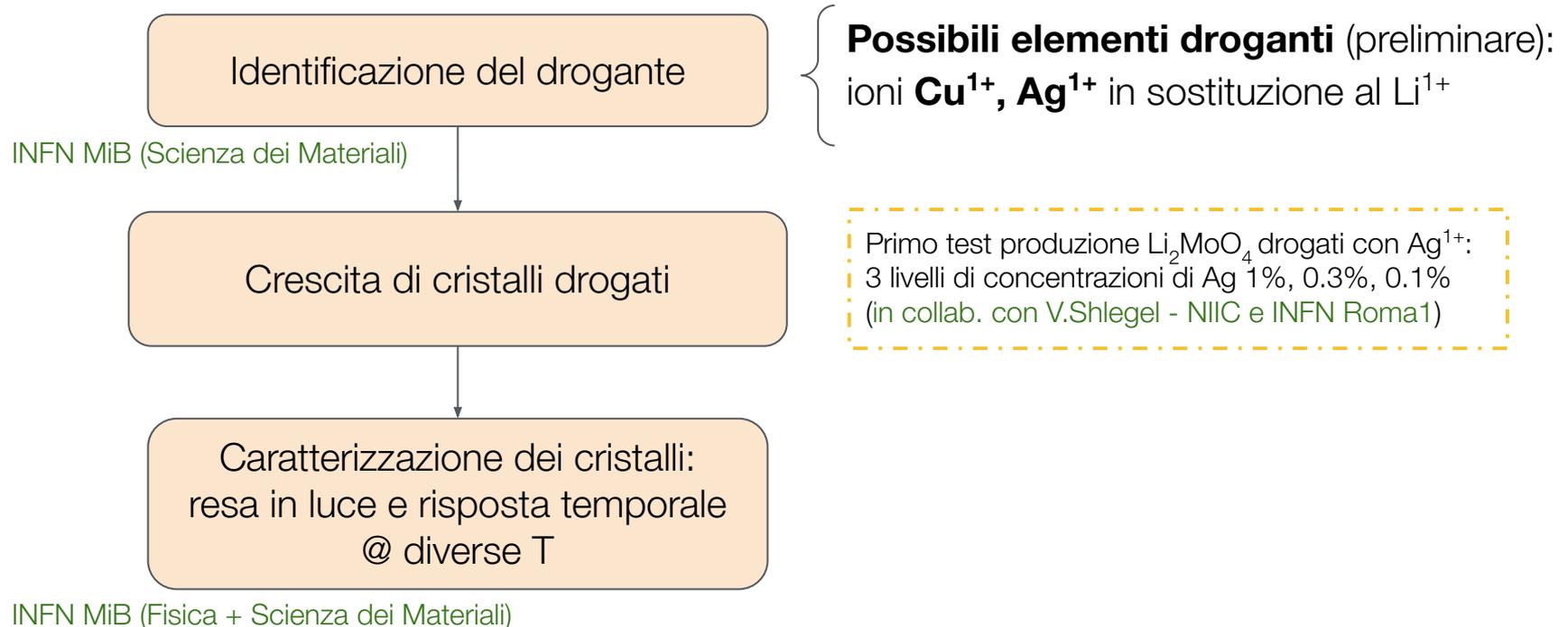
fisica degli eventi rari alle basse temperature:

- incorporazione nel reticolo
- proprietà di emissione vs. banda di trasmissione del reticolo
- droganti con isotopi stabili (bassa radioattività)
- ioni che non introducono centri para/ferromagnetici (> capacità termica a bassa T)
- evitare introduzione di trappole o meccanismi che possano ritardare (o ridurre) emissione luminosa



CALIPSO WP 2: Drogaggio dei cristalli scintillanti

Drogaggio di cristalli scintillanti Li_2MoO_4 per CALIPSO



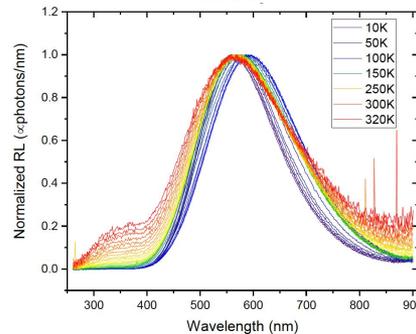
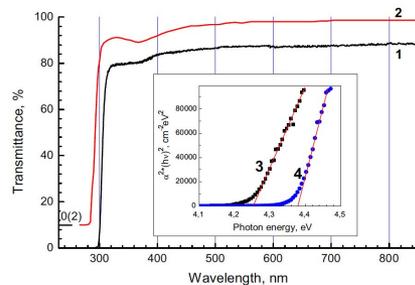
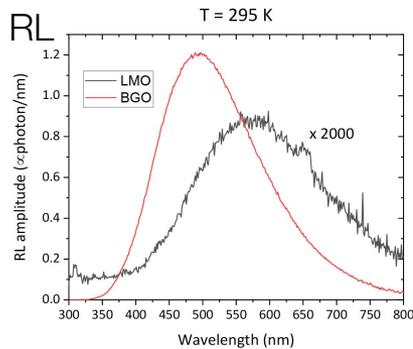
CALIPSO WP 3: Misure sperimentali

Caratterizzazione della scintillazione (10-300K) @ UniMiB Scienza dei Materiali

Studio proprietà ottiche dei cristalli, natura di centri di emissione → Feedback per la crescita di nuovi cristalli

Cristalli LMO:

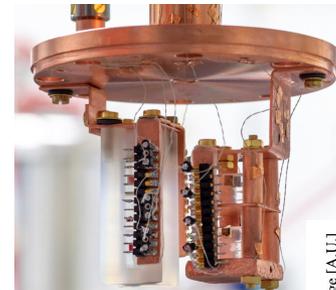
- Curve di trasmissione
- Spettri di radio/foto-luminescenza
- Spettri di termoluminescenza



collegato a WP2

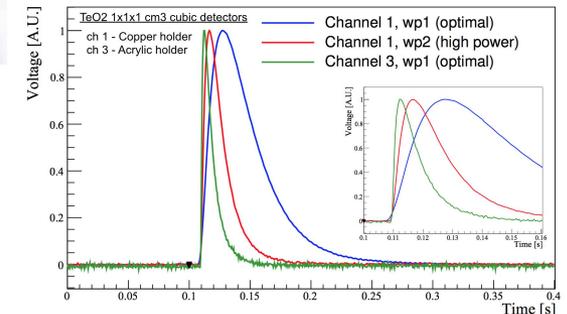
Misure criogeniche (10-50mK) @ UniMiB Fisica - Lab. Criogenia

Prestazioni nuovi rivelatori (accoppiamenti, cristalli,..) operati effettivamente come calorimetri criogenici



Rivelatori TeO₂ con differenti montaggi, installati nel criostato di Lab. Criogenia

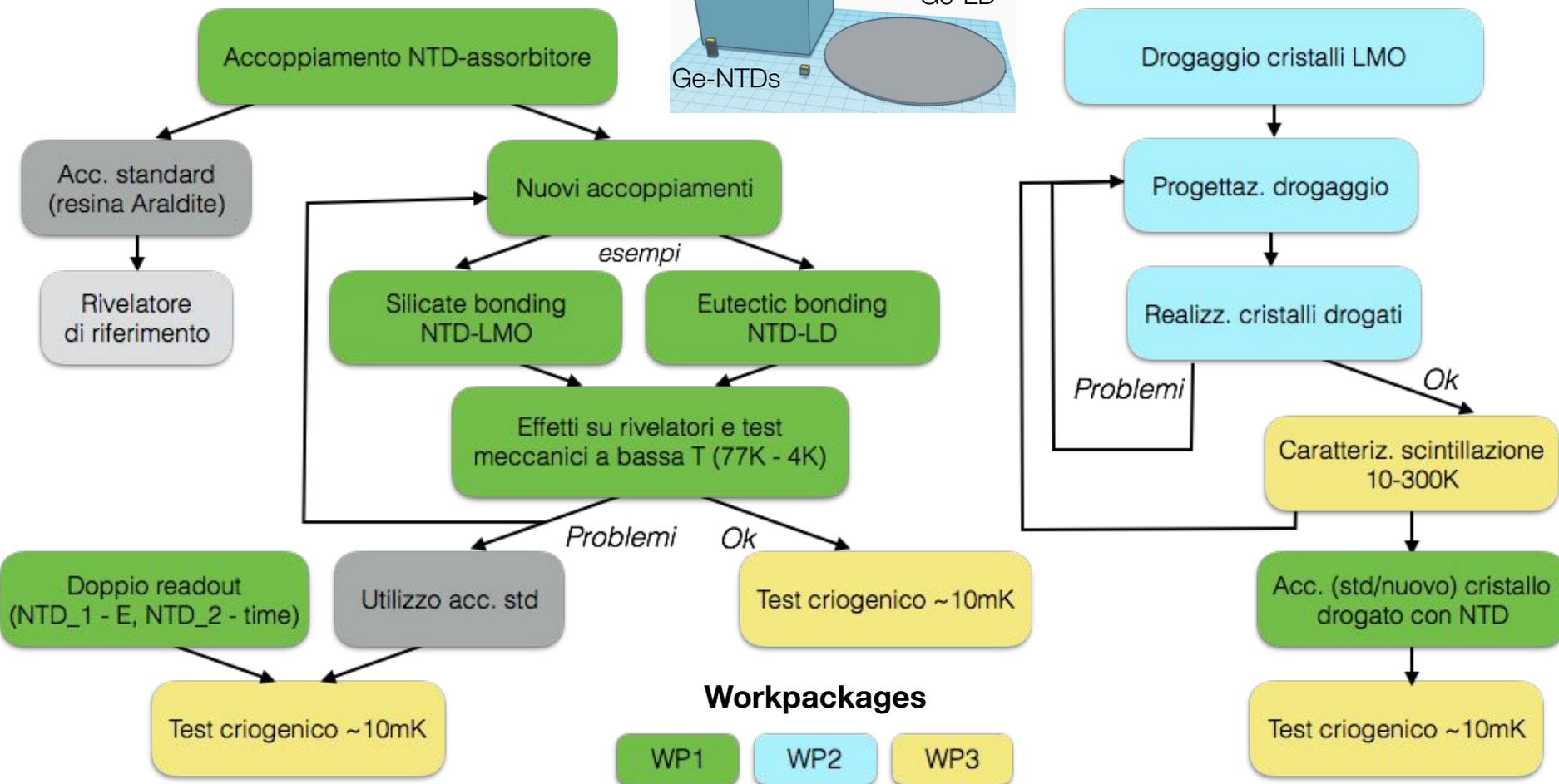
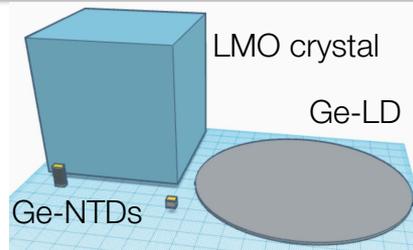
Impulsi di calore per cristalli TeO₂ in montaggi differenti



<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01978-9>
<https://doi.org/10.1007/s10909-021-02639-y>

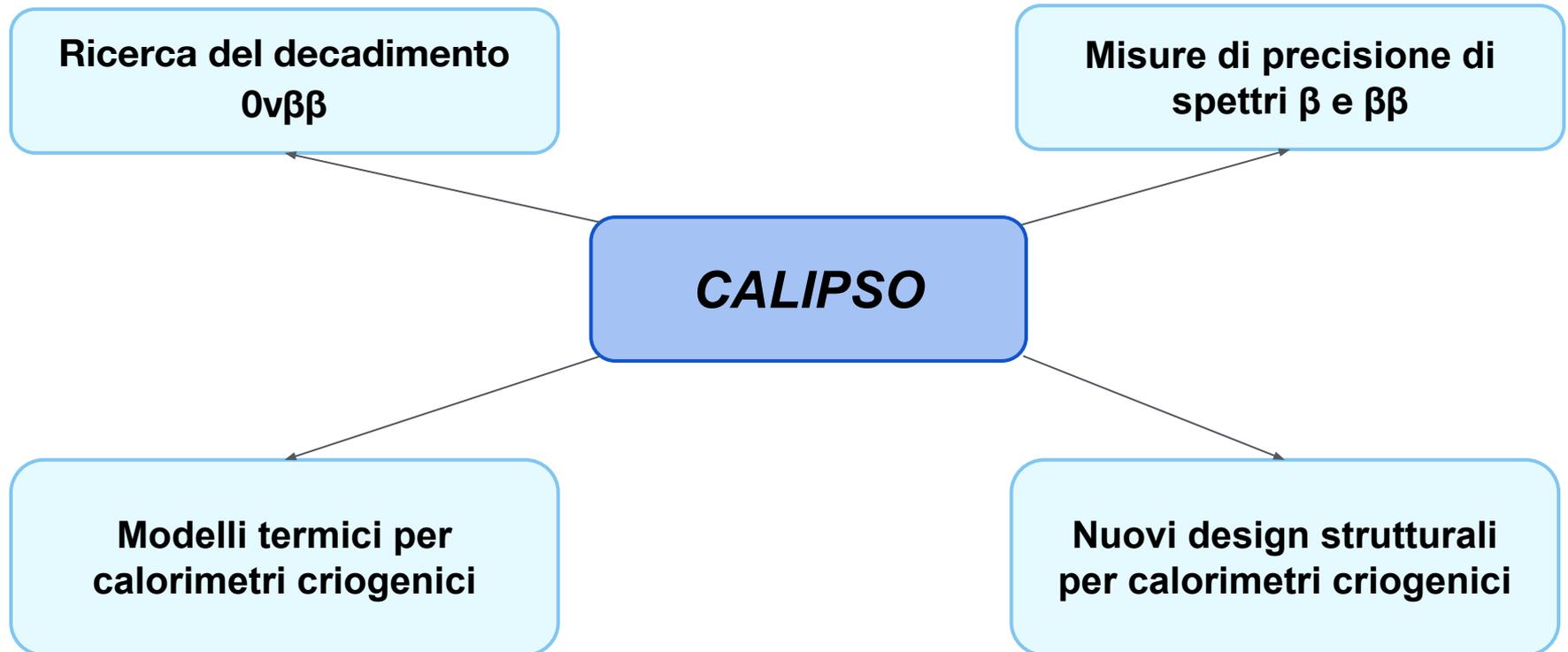
collegato a WP1 (e a WP2)

Organizzazione delle attività per CALIPSO



Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Sinergie e impatto su diversi campi di ricerca

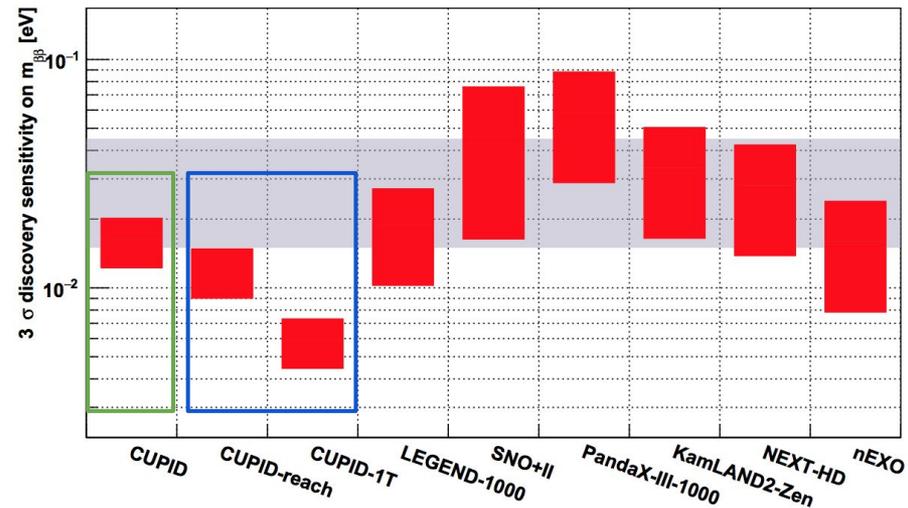


Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

- Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ (CSN2)

utilizzo di calorimetri scintillanti arricchiti in isotopo $\beta\beta$ su scala 1 ton/1000 rivelatori per la prossima generazione di esperimenti (CUPID) → abbattimento del fondo - pileup $2\nu\beta\beta$

	δt e SNR necessari	Stato e prospettive
CUPID-baseline (TDR)	$\delta t \sim 0.14$ ms (calore/luce), SNR ~ 100 (LD)	Risk mitigation strategy → Possibilità implem. soluzioni CALIPSO
CUPID-reach	$\delta t \sim 0.07$ ms SNR $\sim 100/600$	Necessità di implementare nuove tecniche → CALIPSO
CUPID-1 ton	$\delta t < 0.07$ ms SNR ~ 600	



Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

- **Misure di precisione di spettri di decadimento β e $\beta\beta$** (CSN2 e CSN3)

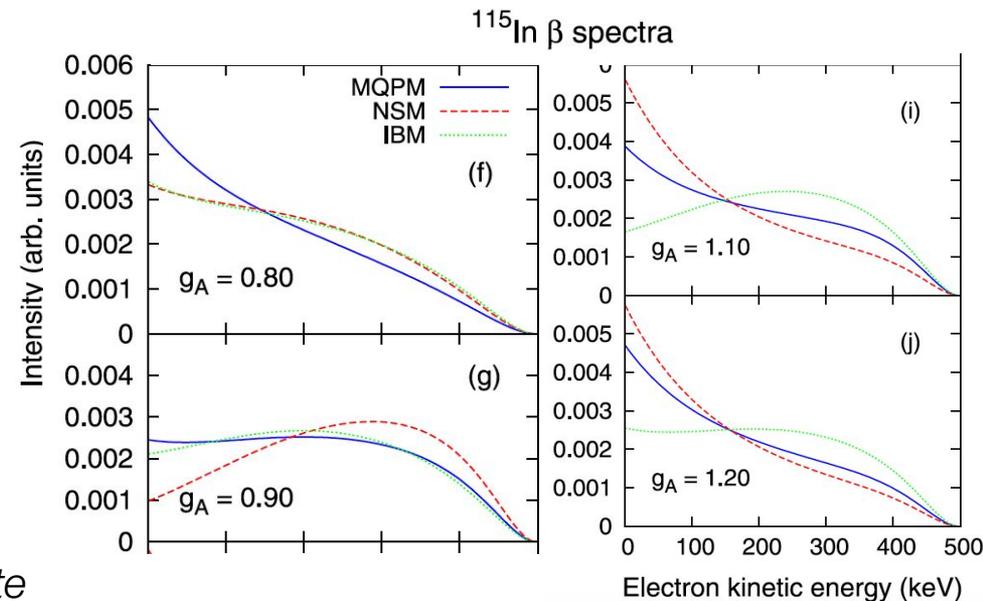
Messa a punto di **modelli nucleari**

Sensibilità a **variazione di forma spettro**:

- Alta risoluzione energetica
- Abbattimento sistematiche su sorgente
- **Alta statistica**: assorbitori di maggiore massa / arricchimento
⇒ alto rate → necessaria alta risoluzione temporale per reiezione pileup

Misure con calorimetri criogenici (*Novità!*)

- *Primi prototipi: In_2O_3 crystal (0.1 cm³) + Ge-NTD → $t_{\text{Rise}} \sim 4\text{ms}$, pileup $\sim 10\%$, β -rate 100mHz)*
- **CALIPSO** → **macro-calorimetri**



<https://journals.aps.org/prc/pdf/10.1103/PhysRevC.95.024327>

Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

- **Modelli termici per esperimenti con macro-calorimetri criogenici (CSN2)**

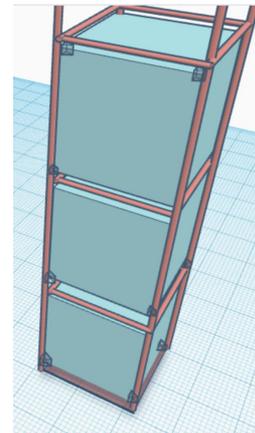
CUORE/CUPID - $\beta\beta$

COSINUS - dark matter

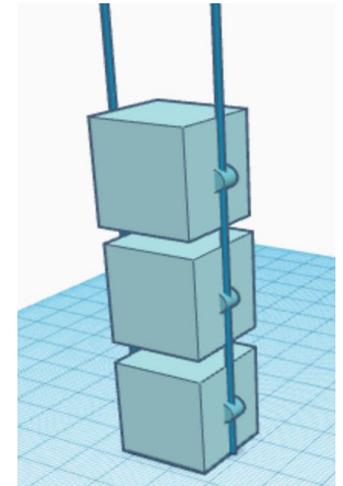
- **Nuovi design strutturali di calorimetri criogenici per eventi rari (CSN5 - CSN2)**

(Futuro!) Se nuove strategie di accoppiamenti termici funzionali a $\sim 10\text{mK}$ (migliore termalizzazione, impulsi più veloci, riduzione del rumore termico)

→ Nuovi design di accoppiamenti meccanici, sospensioni e termalizzazioni



Cu-frames + PTFE spacers



Suspension fibers bonded to crystals

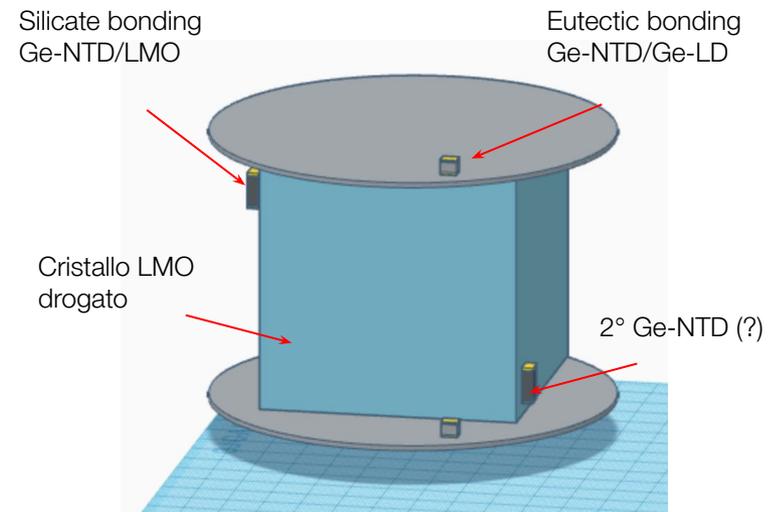
CALIPSO: dettaglio costi

		1° anno (k€)	2° anno (k€)	Tot (k€)
Consumi	<i>Liquidi criogenici (LHe, LN2)</i>	21	42	63
	<i>Produzione cristalli drogati</i>	15	10	25
	<i>Wafer Ge per LD</i>	2.5	2.5	5
	<i>Materiali per bondings e montaggi</i>	3	4	7
	<i>Pb per schermo criostato</i>		10	10
Inventariabile	<i>DAQ e FE</i>	2	4	6
	<i>Strumentazione per caratt. cristalli</i>	30		30
Trasferte	<i>Meetings per attività sperimentali</i>	1.5	2.5	4
		75	75	150

Il progetto CALIPSO

Prototipo di macro-calorimetro criogenico scintillante con sensori NTD, con risoluzione temporale $\delta t < 0.05$ ms e risoluzione energetica $\sim 0.2\%$

- **Novità e originalità** delle **tecnologie e tecniche** proposte, rispetto ad approcci tradizionali per realizzazione rivelatori termici
- **Miglioramento** prestazioni dei macro-calorimetri, affiancato da migliore comprensione risposta
- Approccio di misura **comparativo** (diverse tecniche, diversi drogaggi,..)
- **Sinergie** tra gruppi e istituzioni con diverse expertise e competenze
- **Applicazioni multiple** in campi di ricerca INFN - fisica delle astroparticelle e nucleare

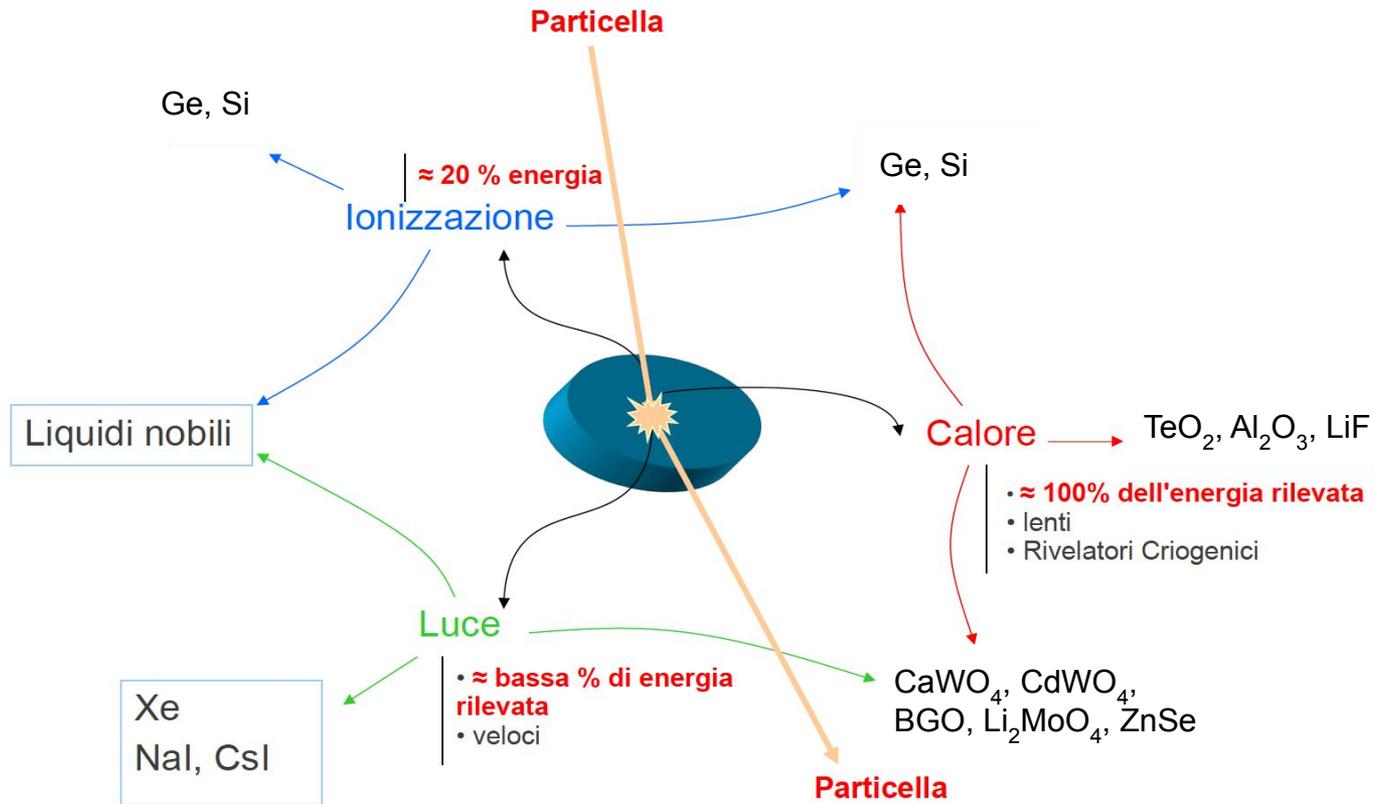


Schema prototipo di CALIPSO

Grazie per l'attenzione

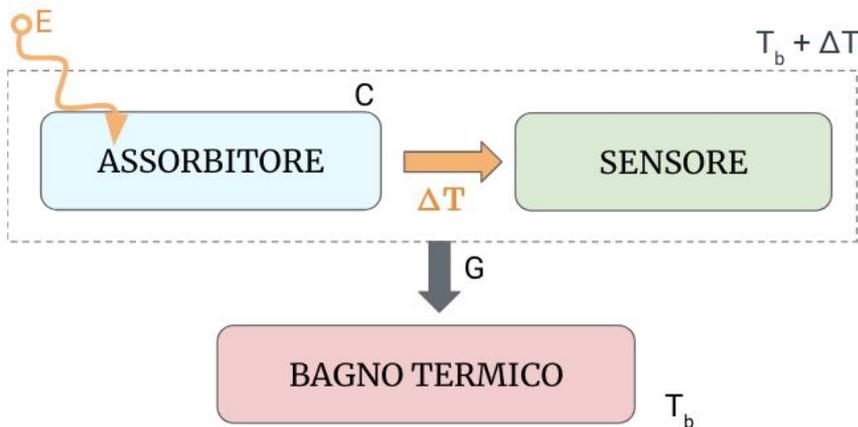
Backup

Calorimetri criogenici nella fisica delle astro-particelle



Calorimetri criogenici nella fisica delle astro-particelle

Evoluzione del segnale in un rivelatore termico: versione semplificata



Assorbimento e termalizzazione

Una particella interagisce nell'assorbitore. Tutta l'energia depositata E si converte in calore e la temperatura dell'assorbitore aumenta di una quantità $\Delta T = E/C$. La temperatura del sensore aumenta di conseguenza, producendo una variazione misurabile delle sue proprietà (elettriche, magnetiche...)

Recupero della temperatura

Il calore fluisce attraverso la conduttanza G verso il bagno e la temperatura del bolometro torna al valore iniziale T_b con un tempo caratteristico $\tau = C/G$

Calorimetri criogenici nella fisica delle astro-particelle

Macrocalorimetri: risposta temporale

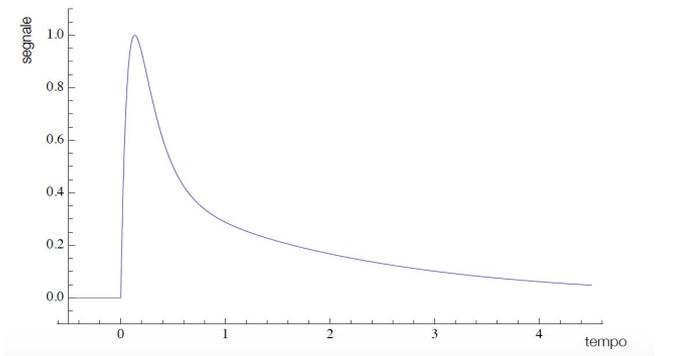
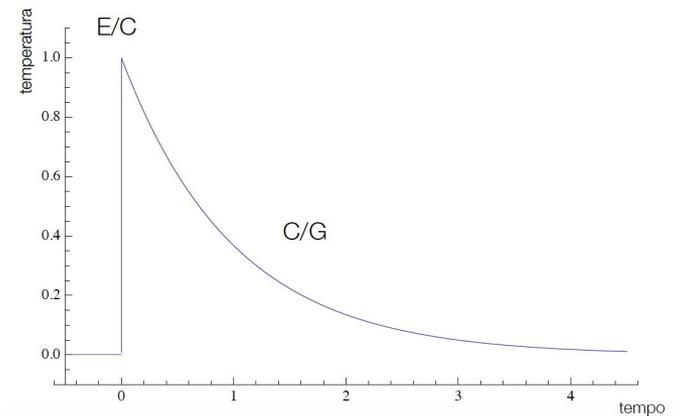
Caso ideale:

- Salita istantanea: rilascio istantaneo di energia
- Discesa con una costante di decadimento: recupero della temperatura di base

Caso reale (considerando anche la lettura del sensore e gli accoppiamenti)

- Salita esponenziale: effetti elettrici (RC dei fili, filtri) + rilascio di energia non istantaneo (rispetto ai tempi di termalizzazione)
- Discesa con più di una costante di decadimento: modello termico a più elementi (termometro, accoppiamenti non trascurabili) e/o meccanismi di rilascio ritardato di energia (scintillazione, intrappolamento) e/o feedback elettrotermico del sensore

→ limiti alla risoluzione temporale intrinseca dei rivelatori

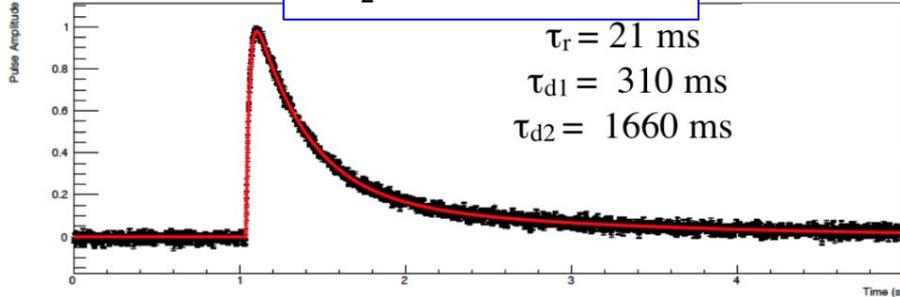


Calorimetri criogenici nella fisica delle astro-particelle

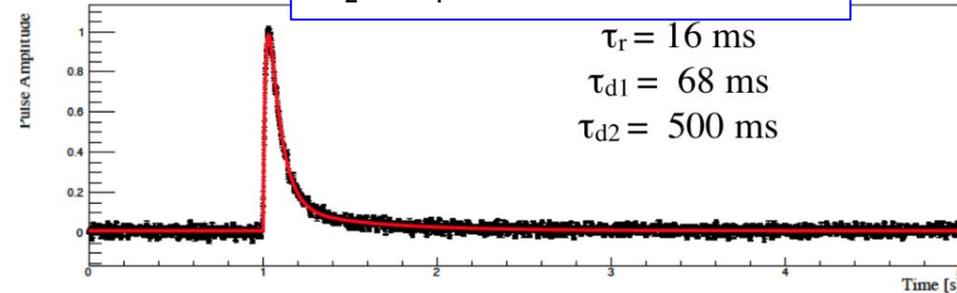
Macrocalorimetri con sensore NTD (esempi): risposta temporale

Gli attuali LTD con lettura a NTD si presentano come rivelatori con una risposta temporale complessa e con risoluzione temporale limitata ($\delta t \sim 1$ ms), e possono sostenere rates ~ 1 -100 Hz

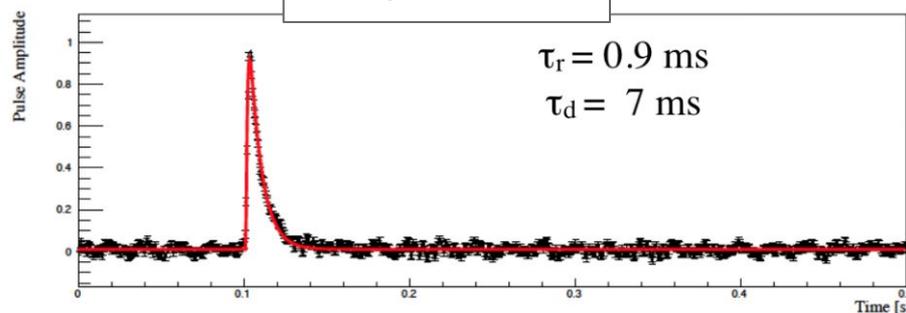
TeO₂ crystal (5x5x5 cm³)



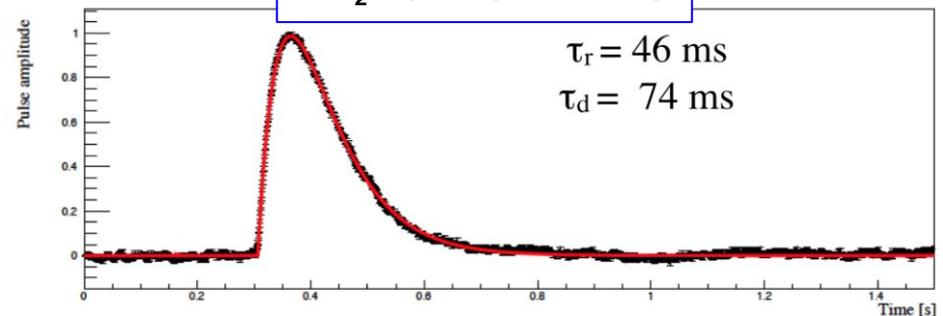
Li₂MoO₄ crystal (4.5x4.5x4.5 cm³)



Ge Light Detector



TeO₂ crystal (1x1x1 cm³)



Salita esponenziale - non istantanea; Costanti di discesa multiple

Calorimetri criogenici nella fisica delle astro-particelle

Applicazioni in differenti filoni di ricerca e esperimenti (approvati in CSN2):

- **Ricerca del decadimento $\beta\beta$ senza emissione di neutrini:**

CUORE (TeO_2 + NTD: 1 ton / 1000 rivelatori)

CUPID-dimostratori ($\text{ZnSe}/\text{Li}_2\text{MoO}_4$, Ge-LD + NTD: ~ 10 kg / 20-30 rivelatori)

CUPID-baseline (Li_2MoO_4 , Ge-LD + NTD: 1 ton / 1500 rivelatori)

- **Studio del decadimento β (o cattura elettronica) e misura di spettri energetici β :**

HOLMES ($^{163}\text{Ho}:\text{Au}$ + TES: qualche g / 100-1000 rivelatori)

- **Ricerca diretta di materia oscura:**

COSINUS (NaI , Si-LD, CdWO_4 carrier + TES/NTD: 50g - 200g \rightarrow 4 kg / 25 rivelatori),

CRESST (CaWO_4 + TES: 20g - 200g / 10-20 rivelatori)

- **Misura di scattering coerente di neutrini:**

NUCLEUS ($\text{CaWO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ + TES (/KID): 10 g \rightarrow 1 kg / 20 rivelatori)

- **Ricerca e misura di decadimenti alfa/beta rari**

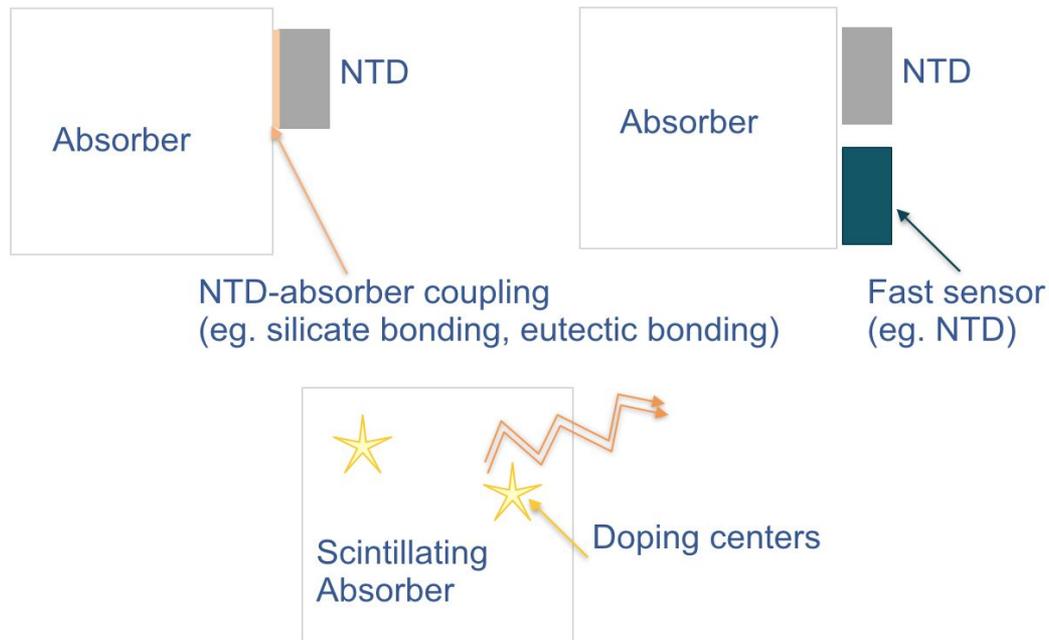
Il progetto CALIPSO: gruppo di ricerca

Nome	Unità	Ruolo	Età	FTE
Irene Nutini	INFN MiB (Fisica)	PI	31	0.8
Luca Gironi	INFN MiB (Fisica)	Collaboratore	40	0.3
Matteo Biassoni	INFN MiB (Fisica)	Collaboratore	36	0.3
Elena Ferri	INFN MiB (Fisica)	Collaboratore	38	0.3
Mauro Fasoli	INFN MiB (Sc. dei Mat.)	Referente unità	49	0.3
Francesca Cova	INFN MiB (Sc. dei Mat.)	Collaboratore	29	0.2
Fabio Bellini	INFN Roma1	Referente unità	44	0.2
Totale gruppo di ricerca				2.4

Il progetto CALIPSO

Approcci di sviluppo del rivelatore per CALIPSO

macro-calorimetro criogenico scintillante con sensore NTD di readout, con risoluzione temporale < 0.05 ms



Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio tradizionale

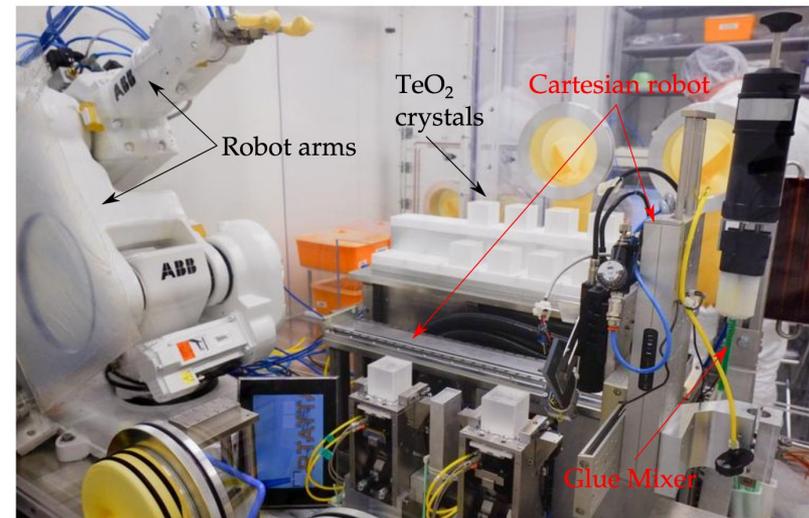
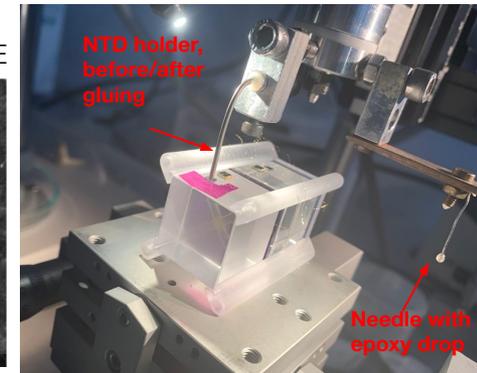
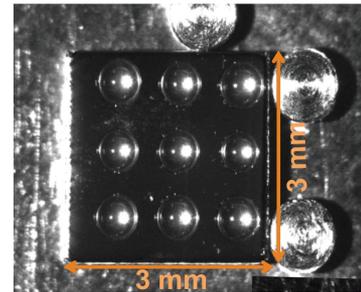
Adhesive bonding

Incollaggio NTD su cristallo con colle/resine

Approccio utilizzato negli ultimi 25-30 anni
Resine bicomponenti con breve tempo di indurimento (eg. Araldite: ~1 h @ 25°C), bassa radioattività e buona conduttanza termica a basse temperature

Velo di colla \Rightarrow spots multipli;
Strumenti automatici per incollaggi precisi e riproducibili per centinaia/migliaia di sensori
 \rightarrow Minore variabilità di forma del segnale, ma risoluzione temporale limitata

Glue spots on NTD for CUORE



CUORE gluing robot

Accoppiamenti assorbitore-NTD

- ***Approccio innovativo del progetto CALIPSO***

Sviluppare **nuovi tipi di accoppiamento NTD-rivelatore**, applicabili di routine su un alto numero di rivelatori garantendo una risoluzione temporale migliore e uniforme

Due tecniche proposte:

- **"silicate bonding"**,
- **"eutectic bonding"**

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (1)

Silicate bonding

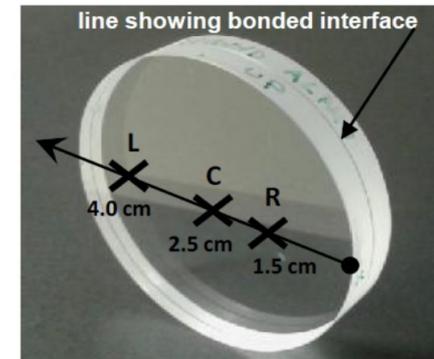
Tecnica sviluppata per applicazioni astronomiche da circa 20 anni
(LIGO, VIRGO, Nasa rovers on Mars).

Soluzione di idrossido in acqua per formare un legame chimico tra ossidi o materiali facilmente ossidabili.

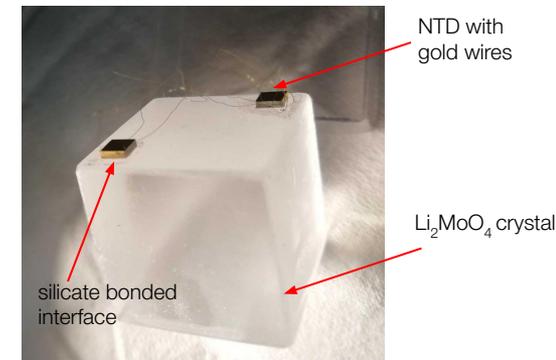
Tecnica appropriata per sistemi in ultra-alto vuoto, temperature criogeniche (fino a ~ 10 K) e alti carichi meccanici.

→ **Silicate bonding per CALIPSO:** utilizzo di sospensione di nanoparticelle di silicato di sodio ($(\text{Na}_2\text{O})_x \cdot (\text{SiO}_2)_y$) per l'accoppiamento dei termistori Ge-NTD sui cristalli e sui rivelatori di luce.

- Rugosità delle superfici (ottimale $\sim \text{nm}$)
- Effetto di utilizzo di 'gocce di soluzione acquosa' su superfici di cristalli igroscopici (es. Li_2MoO_4)
- Test di forza e conduttanza del bonding a temperature ~ 10 mK



Silicate bonding: due substrati SiO_2 - VIRGO



Primo test silicate bonding: Ge-NTD / Li_2MoO_4 testato fino a 77K (realizzato in collab. con INFN Ferrara)

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (1)

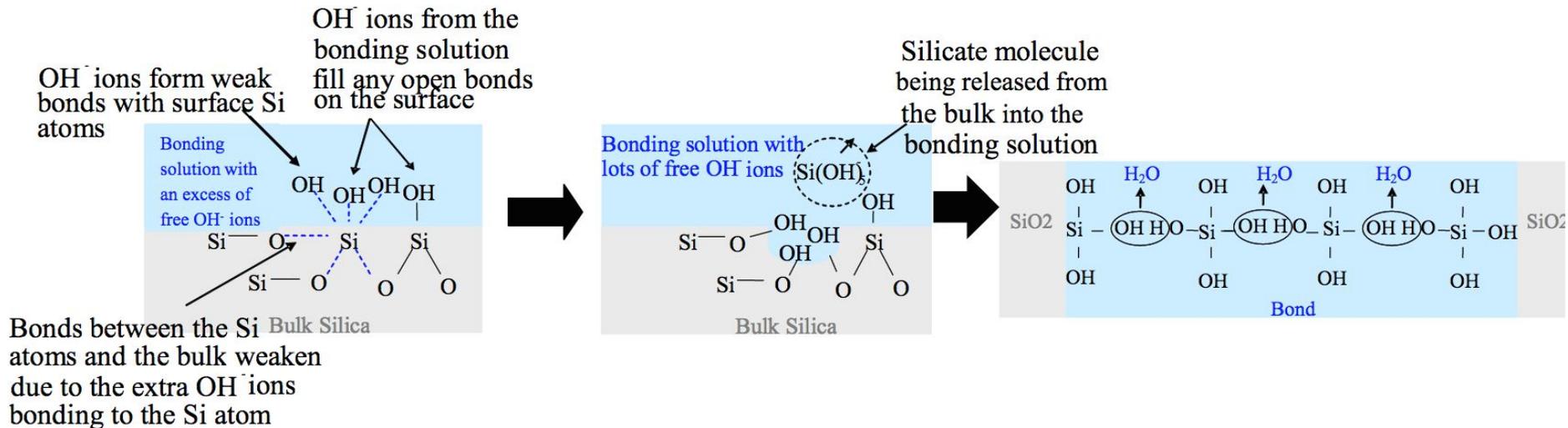
Hydroxide cathalysis bonding (HCB)

→ silicate bonding (bonding HCB con soluzione di silicato di sodio)

Hydration and Etching

Polymerisation

Dehydration



Si utilizza una **soluzione di idrossido in acqua** per **formare un legame chimico tra ossidi o materiali ossidabili**.

Gli ioni idrossido (OH^-) tendono a legare con vari materiali in forma ossida (es. SiO_2 - silice/vetro, Al_2O_3 - zaffiro) oppure anche con materiali facilmente ossidabili (es. silicio, SiC , alluminio, vetri trattati, vetroceramiche,..). Soluzioni idrosside comunemente utilizzate per il bonding sono KOH e NaOH principalmente per accoppiamenti diretti SiO_2 - SiO_2 , altrimenti si utilizzano anche **soluzioni di silicato di sodio ($\text{NaOH} + \text{SiO}_2$) per bonding tra substrati diversi**.

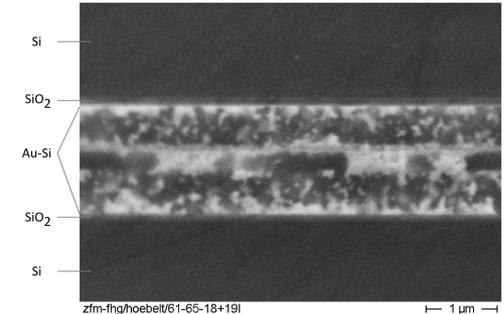
Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (2)

Eutectic bonding

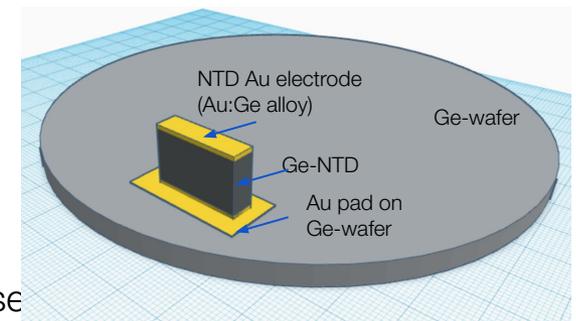
Le leghe eutettiche sono spesso utilizzate per l'incollaggio di wafer (Si, Ge) nella fabbricazione di semiconduttori e nell'industria microelettronica. Accoppiamento di substrati con uno strato intermedio metallico, che produce un sistema eutettico. **Saldature eutettiche: deposizione metallo eutettico, riscaldamento del sistema (~150-300°C) e pressione tra i substrati.**

→ Eutectic bonding per CALIPSO:

1. Accoppiamento dei Ge-NTD ai rivelatori di luce (Ge-wafer): lega eutettica Au-Ge dell'elettrodo del NTD, o layer intermedio di lega Au(88%):Ge(12%)
2. Accoppiamento dei Ge-NTD ai cristalli (ossidi): lega Au-Ge dell'elettrodo su ossido, o aggiunta di layer intermedio di Indio
 - Effetti di outgassing alla superficie dei cristalli o stress termici per riscaldamento per realizzazione lega eutettica
 - Stabilità e proprietà delle giunzioni eutettiche NTD-rivelatori a basse temperature (fino a 10 mK)



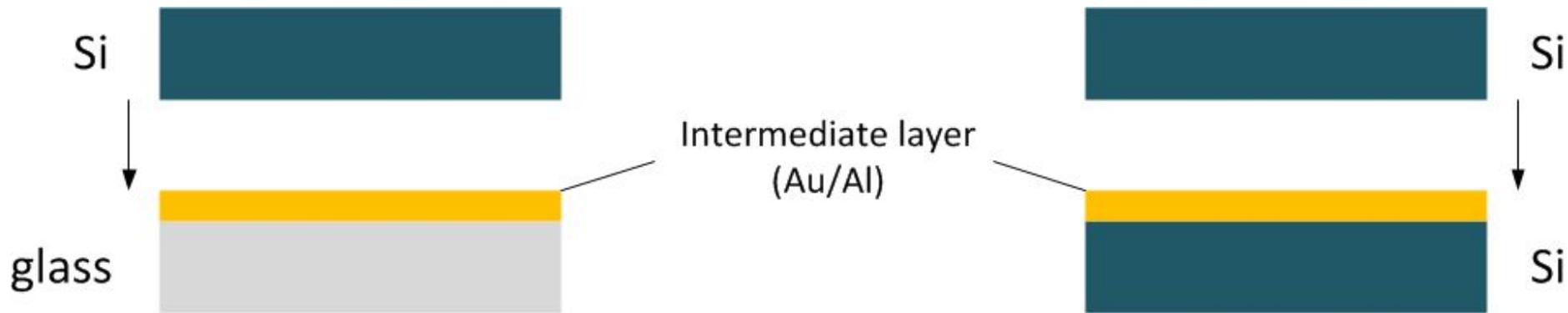
Sezione di un bonding eutettico Au-Si tra due substrati in Si



Schema realizzazione eutectic bonding: Ge-NTD / Ge-wafer

Accoppiamenti assorbitore-NTD: approccio innovativo (2)

Eutectic bonding



Le formazioni eutettiche più diffuse sono Au-Si e Al-Si; questa procedura si utilizza principalmente **per accoppiare wafers di Si** utilizzando un **coating in film di Au/Al**. Nel caso di **accoppiamenti tra Si e vetro (SiO₂)**, si deposita anche un **sottile strato di adesione intermedio (es. Ti/Cr) tra l'ossido e il metallo eutettico, per facilitare l'aderenza tra i due**. Altre leghe eutettiche per il bonding sono: Au-Ge, Au-In, Al-Ge,...

Saldatura eutettica: sottoporre i due elementi a riscaldamento ($T_e \sim 150-500$ °C, in base alla lega eutettica; $T_e < T_f$) e pressione per creare la giunzione eutettica → il coefficiente di espansione termica tra i substrati deve essere sufficientemente simile, per evitare stress termici e/o incrinature del bonding.

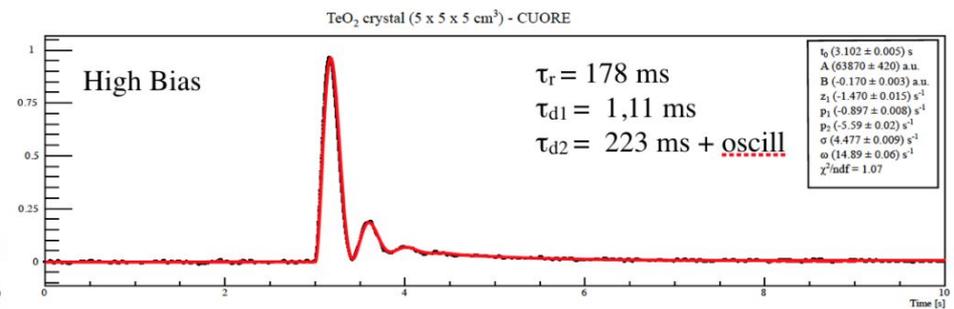
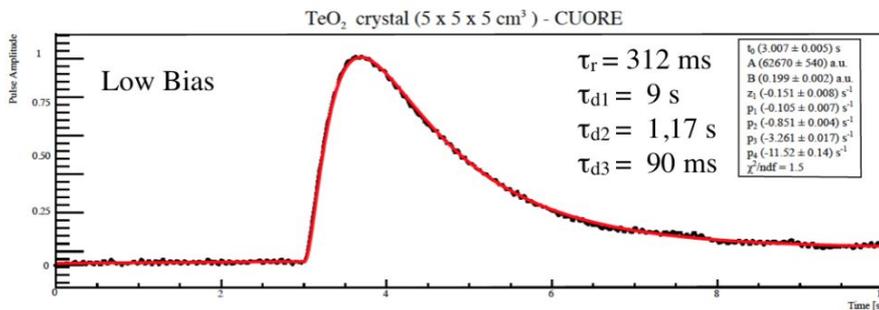
CALIPSO WP 1(b)

Aggiunta di un secondo NTD per il readout

Doppia lettura: NTD_1 + NTD_2

- NTD_1 operato in maniera convenzionale: misura di energia, alto SNR
- **NTD_2** operato in condizioni di **alto bias** → **impulsi più veloci** e maggiore risoluzione temporale (a scapito di SNR e linearità della risposta)

Valutazione se doppia lettura con entrambi NTD polarizzati, influenza generazione segnale termico e temperature di termalizzazione.



Si utilizzerà approccio WP 1(b) se le varie tecniche di bonding proposte in WP 1(a) si dimostrano non-funzionali e/o inefficaci per gli obiettivi del progetto.

CALIPSO WP 1(b)

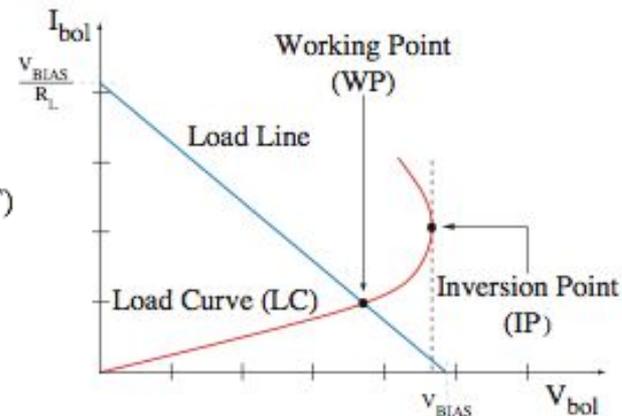
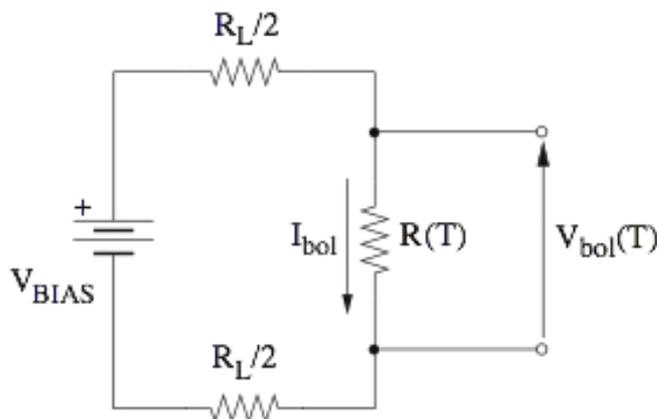
Aggiunta di un secondo NTD per il readout

Doppia lettura: NTD_1 + NTD_2

- NTD_1 operato in maniera convenzionale: misura di energia, alto SNR
- **NTD_2** operato in condizioni di **alto bias** (*): **impulsi più veloci** e maggiore risoluzione temporale (a scapito di SNR e linearità della risposta), per ottenere solo **info temporale** da combinare con info energetica da NTD_1

(*) Circuito di polarizzazione del NTD ($R_{load} \gg R$). Corrente di polarizzazione rilascia potenza per effetto Joule sul termistore, riscaldandolo → **feedback elettrotermico**

Per alte correnti di bias, curva I-V (LC) del termistore devia dalla linearità e porta a comportamento non ohmico → influenza forma di impulso termico: impulsi più veloci e distorsioni nella discesa



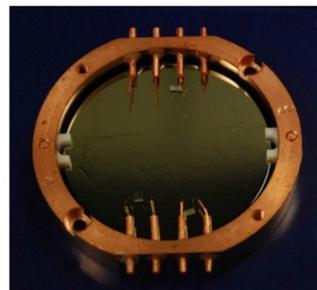
CALIPSO WP 2

Ottimizzazione della scintillazione: approccio tradizionale

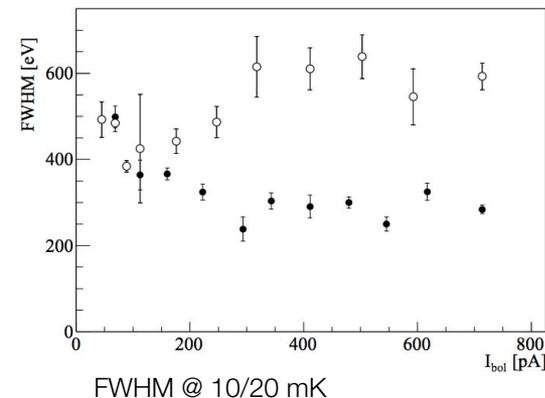
Aumento di SNR e efficienza dei rivelatori di luce

[spessore del LD, dimensione NTD, temperatura e punto di lavoro NTD, riduzione del rumore]

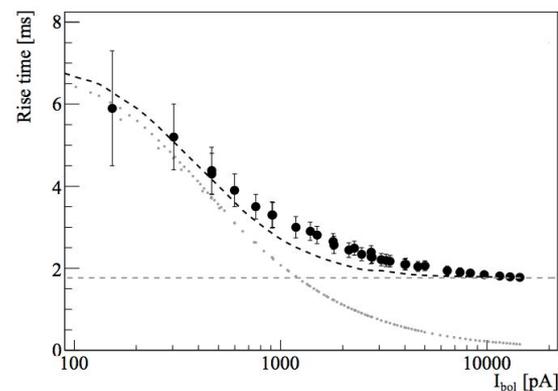
→ basse soglie per la rivelazione della debole luce di scintillazione dal cristallo, buona risoluzione, segnali veloci



Ge-LD + NTD



FWHM @ 10/20 mK



RiseTime @ 20 mK

CALIPSO WP 2: Drogaggio dei cristalli scintillanti

Drogaggio di cristalli scintillanti Li_2MoO_4 per CALIPSO

Identificazione del drogante

Possibili elementi droganti (preliminare):

ioni **Cu^{1+}** , **Ag^{1+}** in sostituzione al Li^{1+}

Progettazione ad-hoc dei droganti per i LMO

INFN MiB (Scienza dei Materiali)

Crescita di cristalli drogati

Incorporazione dello ione nel

sito desiderato nel reticolo

Diverse concentrazioni del

drogante

Primo test produzione

Li_2MoO_4 drogati con Ag^{1+} :

3 livelli di concentrazioni di

Ag 1%, 0.3%, 0.1% (in

collab. con V.Schlegel -

NIIC e INFN Roma)

Caratterizzazione dei cristalli:
resa in luce e risposta temporale
@ diverse T

Effetto del drogaggio sul

processo di scintillazione

INFN MiB (Fisica + Scienza dei Materiali)

Ottimizzazione della scintillazione: approccio alternativo

Drogaggio di cristalli scintillanti LMO - calorimetri criogenici

1. **Identificazione del drogante in base al tipo di cristallo**
2. **Crescita cristalli drogati**
3. **Caratterizzazione scintillazione @4K-300K**
4. **Cristallo come calorimetro criogenico: caratterizzazione di risposta temporale e resa in luce @10mK**

Possibili **elementi droganti per i LMO** (1.) - considerazioni preliminari (da esperienza di drogaggio PWO): ioni luminescenti isovalenti (es. Cu^{1+} , Ag^{1+} in sostituzione al Li^{1+}), metalli di transizione aliovalenti luminescenti (es. Mn^{2+} , Cr^{3+}). Scelta del drogante vincolata anche dalle condizioni per la **crescita dei cristalli** (2.): possibili problemi pratici legati alla natura dei precursori del drogante o all'incorporazione dello ione nel sito desiderato.



Ottimizzazione della scintillazione: approccio alternativo

Drogaggio di cristalli scintillanti LMO - calorimetri criogenici

⇒

Investigazione di **proprietà ottiche e natura dei centri di emissione nel cristallo** (3.):

- Curve di trasmissione (o curve di assorbimento) → Struttura a bande del cristallo, banda di trasparenza, impurezze che introducono picchi di assorbimento.
Spettrofotometro
- Spettri di luminescenza → identificare le frequenze di emissione luminosa. **Eccitazioni UV - fotoluminescenza (PL)** - si eccitano selettivamente i centri luminescenti; **eccitazioni X-rays - radioluminescenza (RL)** - si stimola l'emissione di tutti i centri luminescenti disponibili fornendo energia all'intera matrice cristallina. Rivelatori CCD e/o monocromatori
- Misure di termoluminescenza (TSL) → Studio di trappole che possono influenzare la dinamica di scintillazione - Campioni irraggiati con X-rays a temperatura T_0 , tale da far riempire le eventuali trappole nel reticolo; si scalda dunque il campione con una rampa di temperatura e si misura l'emissione luminosa → Curva di luce emessa in funzione della temperatura di riscaldamento

CALIPSO WP 2

Ottimizzazione della scintillazione: approccio alternativo

Cristalli scintillanti LMO - calorimetri criogenici



Scintillatore intrinseco (centro luminescente MoO_4^{2-} + emissioni di difetto)

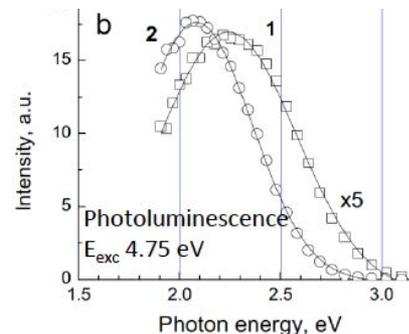
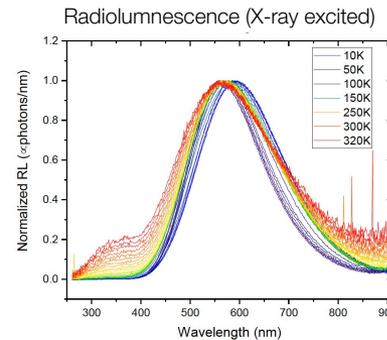
D.A. Spassky et al. / Journal of Luminescence 166 (2015) 195–202

O.P. Barinova et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 613 (2010) 54–57

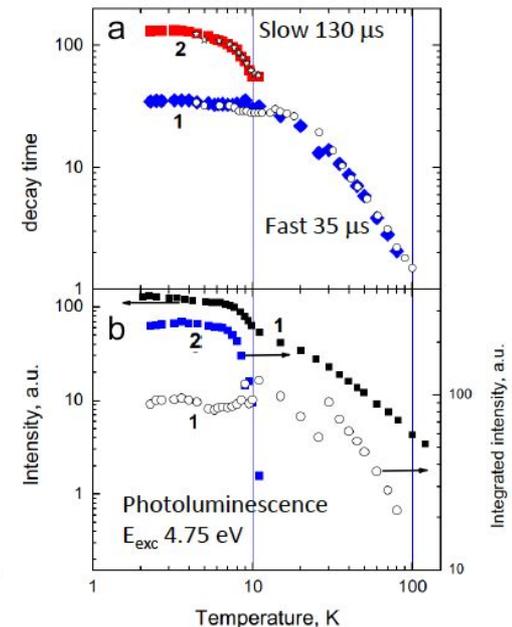
Emission bands

Energy	(FWHM)	PL decay time	
1.98 eV	(0.54 eV)		@ 30-80 K
2.08 eV	(0.7 eV)	slow (130 μs @ 4K)	STE
2.25 eV	(0.7 eV)	fast (35 μs @ 4K)	Trapped Exc

Emission peak maximum - dependent on the growth technique and contamination levels of initial materials (Li_2CO_3 , MoO_3):
 Czochralski ~ 550nm
 Czochralski low thermal gradient && higher purity ~ 600nm



(b) Luminescence spectra of slower(1) and faster(2) decay components of Li_2MoO_4 at $E_{\text{exc}} \sim 4.75$ eV, $T = 4.2$ K. The intensity of faster component is multiplied by factor of 5.



(a) Temperature dependence of fast(1) and slow(2) components in luminescence decay; $E_{\text{em}} \sim 2.10$ eV, $E_{\text{exc}} \sim 4.75$ eV.
 (b) Temperature dependence of the Li_2MoO_4 emission ($E_{\text{em}} \sim 2.10$ eV) under UV ($E_{\text{exc}} \sim 4.75$ eV) excitation(1) and integrated intensities of the fast(2) and slow(3) components of decay.

Organizzazione delle attività per CALIPSO

Timeline delle attività e costi principali

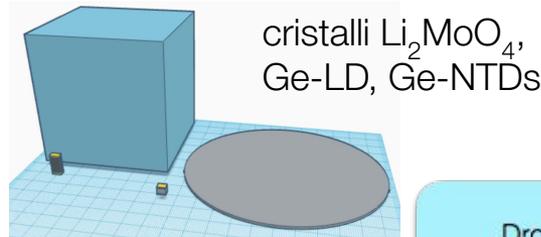
Rivelatore di CALIPSO



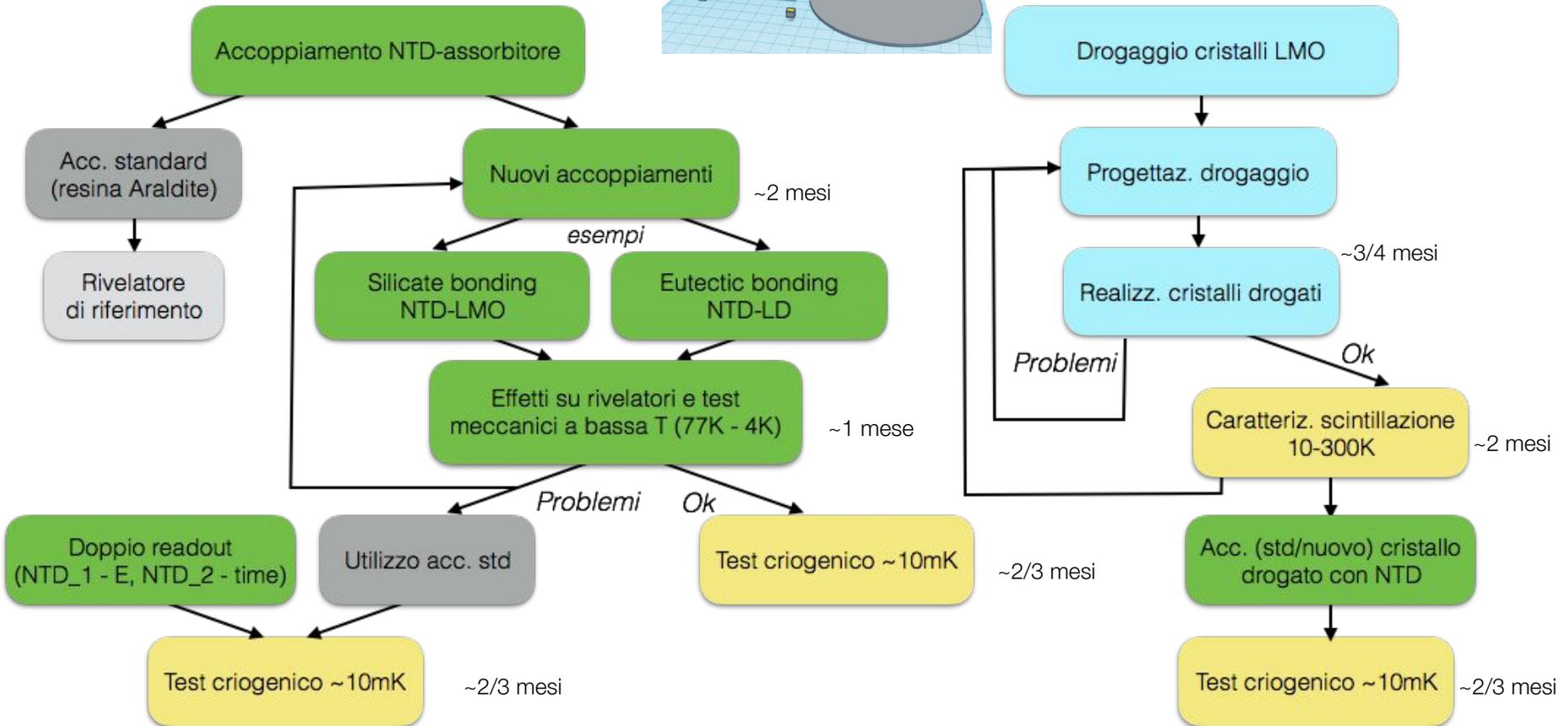
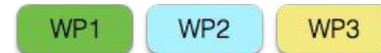
Si costruisce filiera di sviluppo e test di nuova tecnologia da applicare poi anche ad altri calorimetri criogenici scintillanti

Organizzazione delle attività per CALIPSO

Sviluppo del rivelatore per CALIPSO

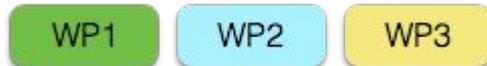


Workpackages



CALIPSO: workpackages

Timeline delle attività: workpackages



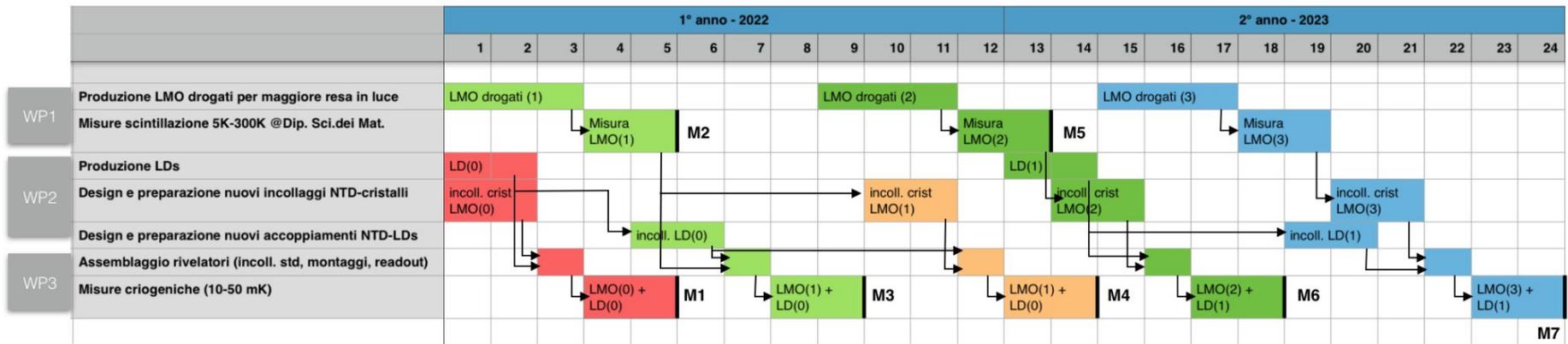
WP1 - Sensoristica e design rivelatori
presso UniMiB - Dipartimento di Fisica

WP2 - Cristalli scintillanti
presso UniMiB - Dipartimento di Scienza dei Materiali

WP3 - Misure sperimentali
Caratterizzazione della scintillazione
Runs criogenici (10-50 mK) presso UniMiB - Dipartimento di Fisica -
Laboratorio di Criogenia

CALIPSO: Gantt plot

Timeline delle attività: cronoprogramma



Principali milestones (M) del progetto:

M1: Performance criogeniche cristalli 'standard' (LMO-puri) con nuovi accoppiamenti

M2: Prima produzione di cristalli LMO drogati (LMO-1): caratterizzazione

M3: Performance criogeniche di cristalli LMO drogati (LMO-1) con sensoristica standard

M4: Performance criogeniche di cristalli LMO drogati (LMO-1) con sensoristica ottimizzata

M5: Nuova produzione di cristalli LMO drogati (LMO-2): caratterizzazione

M6: Performance criogeniche di cristalli LMO drogati (LMO-2) con sensoristica ottimizzata

M7: Design finalizzato di sensoristica-accoppiamenti e cristallo-drogaggi per ottimizzazione risposta temporale e resa in luce a basse temperature

CALIPSO: valutazione del rischio

	Tema	Problema	Mitigazione	Ritardo e conseguenze
WP2	Produzione LMO drogati	I crescitrici ritardano a produrre i cristalli drogati	Minor numero di produzioni di cristalli LMO	Si riducono le misure di caratterizzazione della scintillazione
		I crescitrici del NIIC SB RAS non riescono produrre cristalli LMO drogati di buona qualità	Si contatta un altro crescitricore	Ritardo: tempi tecnici per contatti e ordine con nuovi crescitricori. Si riducono le produzioni di cristalli e le misure di caratterizzazione
WP1	Accoppiamenti HCB NTD-rivelatori	L'accoppiamento HCB con soluzione standard non è efficace: motivi chimici	Provare diverse soluzioni idrossido per l'accoppiamento HCB	Ritardo: tempi tecnici per i nuovi test di soluzioni. Si riducono le prove di accoppiamento con eutettico
		L'accoppiamento HCB con soluzione standard non è efficace: motivi rugosità cristalli	Riprovare lo stesso accoppiam. HCB su rivelatori con superfici più levigate	Ritardo: tempi tecnici lavorazione superfici cristalli/ rivelatori di luci. Si riducono le prove di accoppiamento con eutettico
		L'accoppiamento HCB con soluzione acquosa danneggia le superfici dei LMO, cristalli igroscopici	Spostamento sui test di accoppiamenti eutettici tra NTD e cristallo	Utilizzo di accoppiamento HCB solo per sensori di luce. Si procede in parallelo con accoppiamento eutettico per NTD-LMO e HCB per NTD-LD
	Accoppiamenti eutettici NTD-rivelatori	L'accoppiamento eutettico necessita un riscaldamento che danneggia le superfici	Valutazione di leghe eutettiche a minore temperatura.	Si aumentano le prove di accoppiamento con eutettico. Altrimenti, focalizzazione solo su accoppiamenti HCB
	Dual readout: secondo NTD con feedback - sensore veloce	Il secondo sensore NTD operato a alto bias, scalda troppo il rivelatore	Continuare la lettura in dual readout, se il SNR del primo NTD si mantiene accettabile	Ritardo: tempi tecnici per caratterizzare la nuova configurazione di lavoro del rivelatore e stimare effetto sul SNR del primo sensore.
		Il dual readout inficia la risoluzione energetica del primo sensore	Mantenere la lettura di calore con singolo readout, un solo NTD	Si procede focalizzandosi sull'ottimizzazione accoppiamenti NTD-rivelatori per migliore risoluzione temporale del singolo NTD
WP3	Runs criogenici	Problemi al criostato (es. fughe, connessioni tra stadi termici,...)	Analisi del sistema criogenico e operazioni hardware per risolvere i problemi	Ritardo: tempi tecnici per controllo e manutenzione del sistema criogenico, se elementi di ricambio già presenti in Lab. Criogenia (+ tempi per ordine e consegna eventuali altri elementi per sostituzioni). Si riducono i runs di caratterizzazione a 10-50 mK
		Aumenta il costo di LHe	Si contatta un altro fornitore e/o si ordina meno Elio	Si riducono i runs di caratterizzazione a 10-50 mK

CALIPSO: dettaglio costi

Per il progetto CALIPSO, si prevede una spesa totale di **150k€**, suddivisa in **75k€ per il primo anno, e 75k€ il secondo anno.**

Le risorse finanziarie necessarie per il progetto sono principalmente legate a **consumi e strumentazione per la produzione dei rivelatori e l'effettuazione delle misure sperimentali.**

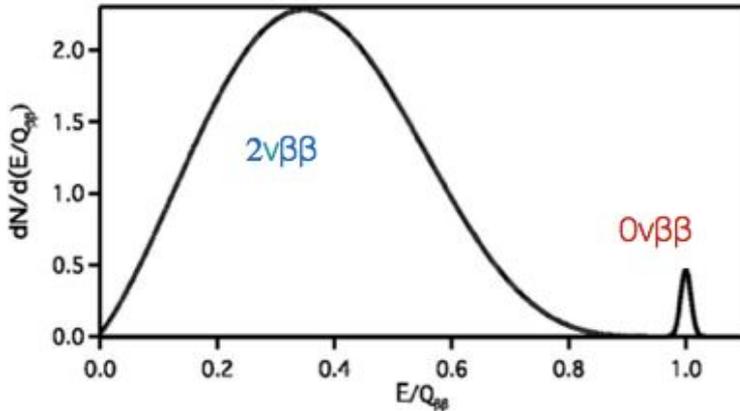
Le maggiori spese coprono l'acquisto di elio liquido (LHe) per il raffreddamento del criostato a diluizione per i runs criogenici a (10-50) mK, e la produzione dei cristalli LMO drogati per una maggiore resa in luce. Inoltre si prevedono spese per manutenzioni e sostituzioni di strumenti per le caratterizzazioni della scintillazione a (10-300) K: termoregolatore TSL e testa fredda del criostato per RL.

CALIPSO: dettaglio costi

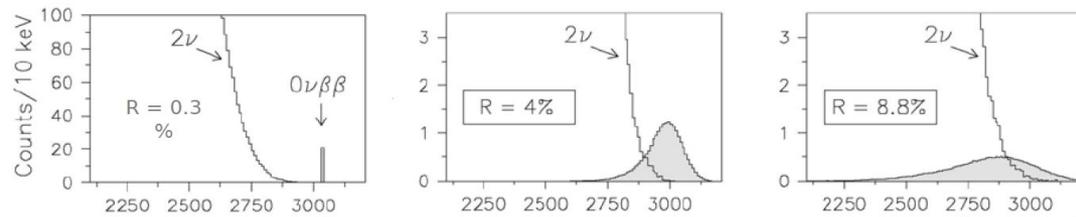
		1°anno (k€)	2°anno (k€)	Tot (k€)
INFN MiB				
Consumi	LHe	20	40	60
	LN2	1	2	3
	Materiali per montaggi (Cu, acrilico)	1,5	2	3,5
	Materiali per bondings	1,5	2	3,5
	Produzione wafer Ge per LDs	2,5	2,5	5
	Pb per schermatura criostato		10	10
Inventariabile	PC acquisizione	2		2
	Boards DAQ/FE dedicate		4	4
	Termoregolatore TSL	20		20
	Testa fredda criostato RL	10		10
Trasferte	Meetings per attività sperimentali	1,5	2,5	4
INFN Roma1				
Consumi	Produzione cristalli drogati	15	10	25
Totale (k€)		75	75	150

Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ - fondo del $2\nu\beta\beta$



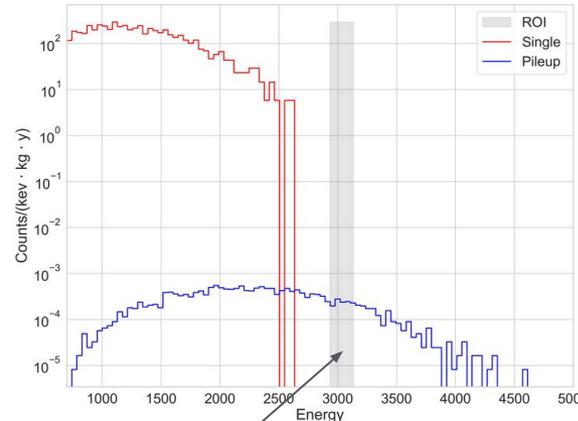
Risoluzione energetica



Risoluzione temporale per riv. termici

Risposta lenta dei rivelatori termici \rightarrow
Pileup accidentale tra eventi $2\nu\beta\beta$ e/o con eventi di fondo - limita l'abbattimento del rate nella ROI per la ricerca di $0\nu\beta\beta$.

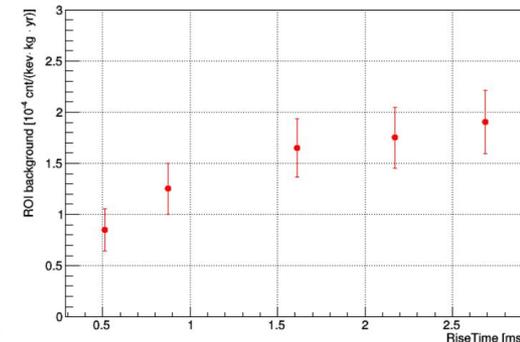
Rivelatori Mo-based: ^{100}Mo $2\nu\beta\beta$ fast decay time = 7.1×10^{18} yr \rightarrow
 3 mHz rate $2\nu\beta\beta$ per i rivelatori di CUPID (300g LMO arricchiti al 100% in ^{100}Mo)



CUPID LMO crystals

Bkg in ROI: $(2.3 \pm 0.5)10^{-4}$ cnt/(keV kg yr) per $\delta t \sim 1$ ms

Residual ROI bkg vs RiseTime - Small Noise



Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ - CUPID: risoluzione temporale e abbattimento del fondo

	Massa ^{100}Mo	Tecnologia	Bkg in ROI	Ris. temporale e SNR necessari	Stato e prospettive
CUPID-baseline	240 kg	Li_2MoO_4 (cristalli arricchiti in isotopo ^{100}Mo) + Ge-LD + NTD con incollaggio standard	$1\text{e-}4$ cts/(keV kg yr) \rightarrow $5\text{e-}5$ cts/(keV kg yr) pileup $2\nu\beta\beta$	$\delta t \sim 0.14$ ms (calore/luce, $t_{\text{Rise}_{\text{LMO}}} < 20\text{ms}$, $t_{\text{Rise}_{\text{LD}}} \sim 1\text{ms}$), SNR ~ 100 (LD)	Bkg goal raggiungibile usando baseline. Possibilità di implementazione soluzioni di CALIPSO sviluppate nel primo anno del progetto
CUPID-reach	240 kg	<i>stessa di CUPID (~)</i>	$2\text{e-}5$ cts/(keV kg yr) \rightarrow $1\text{e-}5$ cts/(keV kg yr) pileup $2\nu\beta\beta$	$\delta t \sim 0.05$ ms	Necessità di implementare soluzioni di CALIPSO: Nuovi accoppiamenti della sensoristica (LD, LMO) + Crist. scintillanti drogati
CUPID-1ton	1000 kg	<i>miglioramento di performance LD e LMO + multi isotopo (?)</i>	$5\text{e-}6$ cts/(keV kg yr)	$\delta t < 0.05$ ms	

Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Misure di precisione di spettri di decadimento β e $\beta\beta$ (per modelli nucleari)

Studio dei processi nucleari nel dec. β e della fisica del neutrino connessa (SM e oltre)

→ Spectrum shape method: validazione dei modelli nucleari

e costanti di accopp. g_A , g_V , matrici nucleari per $(2\nu/0\nu)\beta\beta$

→ Predizione spettro degli anti-neutrini elettronici da reattore: investigazione dell'anomalia da reattori in mis. osc. neutrini

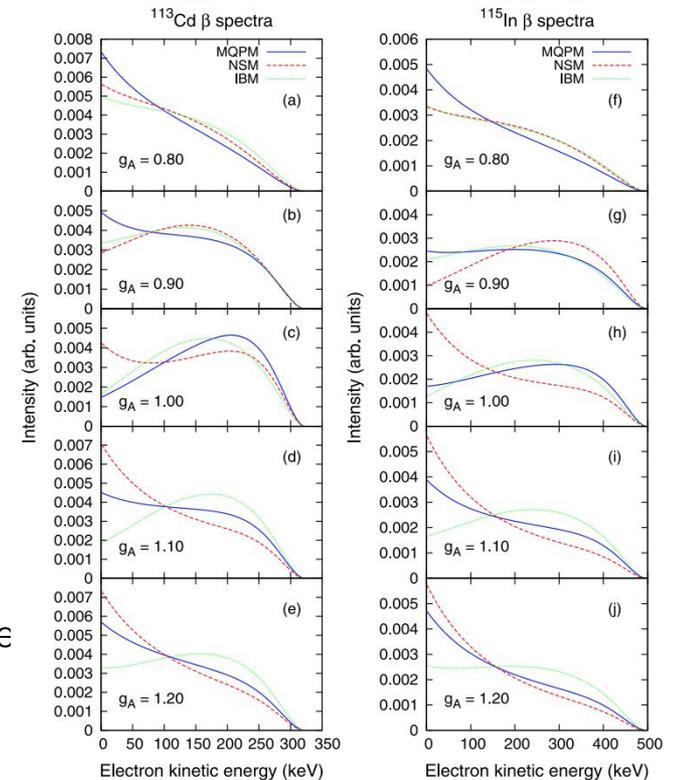
Tecniche di misura:

- Riv. a semiconduttore:

- Tracking, alta ris. energetica (\sim keV) e temporale ($\sim\mu$ s) (+)
- **Sorgente esterna** affacciata al rivelatore → backscattering, strato morto, pandemonium effect (Ge) (-)
- Limite di scalabilità in massa rivelatori e di attività sorgenti utilizzabili (-)

- Riv. termici - macrocalorimetri

- Alta ris. energetica (\sim keV) (+)
- **Sorgente interna** all'assorbitore → alta efficienza di **assorbimento totale** di beta e gamma di disecc. dei nucle figli: abbattimento sistematiche (+)
- Necessità di migliorare ris. temporale per sorgenti a alta attività ($>$ Bq) - possibili def.spettro per pileup
- Scalabilità (+)



<https://journals.aps.org/prc/pdf/10.1103/PhysRevC.95.024327>

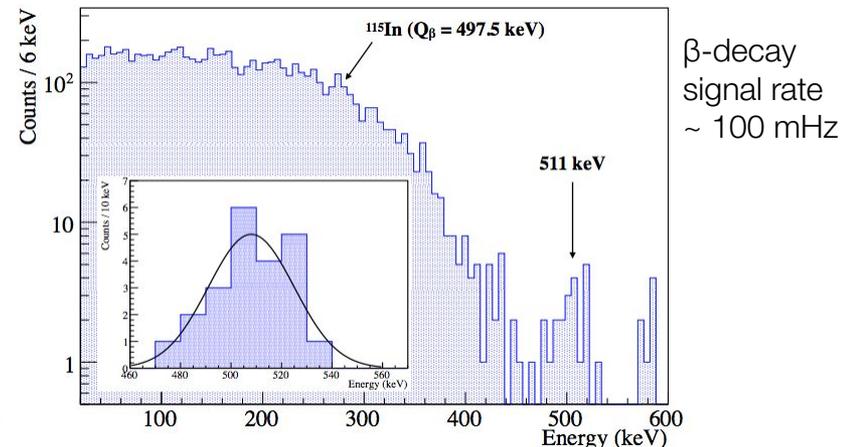
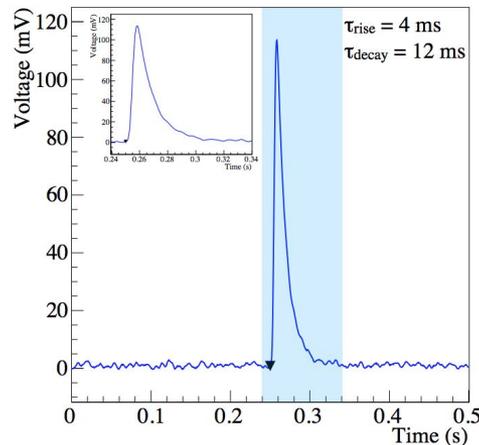
Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Misura di precisione di spettri β (per modelli nucleari)

[Novità - primi prototipi ~ g]

- Alta efficienza di **assorbimento totale** di β e γ di diseccitazione dei nuclei figli
→ abbattimento sistematiche
- Sorgenti a modesta attività ($> \text{Bq}$) → Possibili **deformazioni dello spettro per pileup**

^{115}In β -decay:
 In_2O_3 crystal (0.1 cm^3) + Ge-NTD
Pileup probability ~ 10%



<https://arxiv.org/pdf/2110.03934.pdf>

Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

- **Modelli termici per esperimenti con macro-calorimetri criogenici** (CSN2)
CUORE (CUPID) - $\beta\beta$: identificazione di contributi alla risoluzione energetica, alla risposta temporale e al noise dei cristalli
COSINUS - dark matter: metodologia di ottimizzazione risposta calorimetri scintillanti applicabile anche a cristalli NaI
- **Nuovi design strutturali di calorimetri criogenici per eventi rari** (CSN5 - CSN2)
(Futuro!) Se nuove strategie di accoppiamenti rivelatore-sensore funzionali a $\sim 10\text{mK}$: migliore termalizzazione, impulsi più veloci, riduzione del rumore termico di frizione meccanica tra le superfici e stabilità della giunzione \rightarrow acc. termici \rightarrow nuovi acc. meccanici - sospensioni

Applicazioni e prospettive del progetto CALIPSO

Nuovi design di calorimetri criogenici per eventi rari

Suspension system for interferometers.

Fused silica mirrors and fibers bonded together with HCB-silicate bonding

es. KAGRA cryogenic suspension system @ 20K

Fused silica ears bonded on the side of the fused silica mirror by HCB. Lower sapphire fiber head bonded with the ear and upper head bonded with the sapphire blade by indium bonding (eutectic)

→ Suppression of the vibration from outside like seismic vibration and vibration via heat links

→ Suppression of vibration noise from the cooling system and thermal noise from the suspension

⇒ Applicare simili considerazioni per design sospensioni e termalizzazioni dei macrocalorimetri @10mK per ricerca eventi rari

