

Lettura di scintillatori a NaI(Tl) con fotomoltiplicatori al silicio in criogenia

V. Trabattoni¹ *in rappresentanza della Collaborazione ASTAROTH*
Incontri di Fisica delle Alte Energie – IFAE
3 – 5 Aprile 2024, Firenze

¹Università degli Studi di Milano, INFN – Sezione di Milano



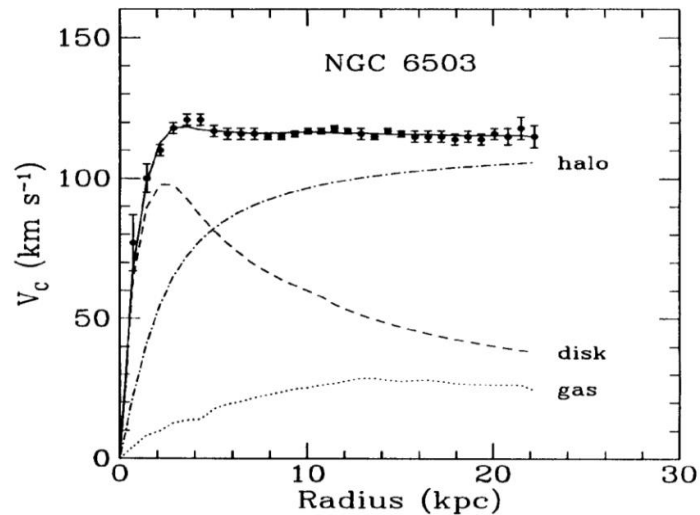
La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)

Evidenze della materia oscura

Curve di rotazione delle galassie



Curve di rotazione di NGC 6503. (K. G. Begeman et al. “Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics”).

La materia oscura

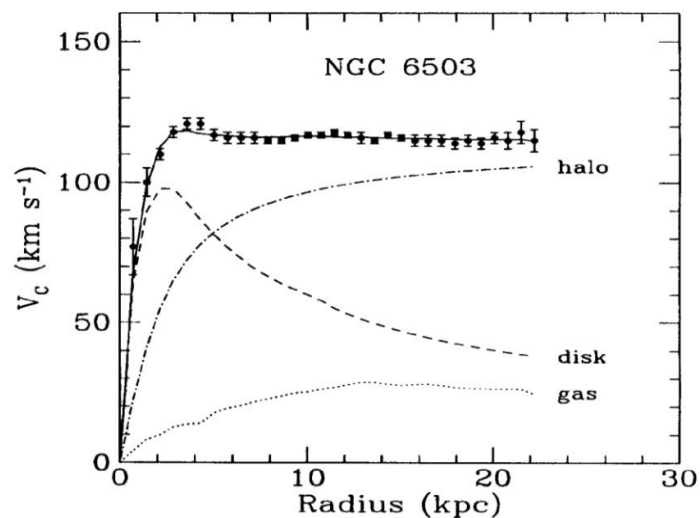
“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)

Evidenze della materia oscura

Curve di rotazione delle galassie

Effetto di lente gravitazionale



Curve di rotazione di NGC 6503. (K. G. Begeman et al. "Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics")



Ammasso di galassie 1E 0657-56, anche chiamato il "Bullet Cluster". ("Astronomy picture of the day", NASA, 2004)

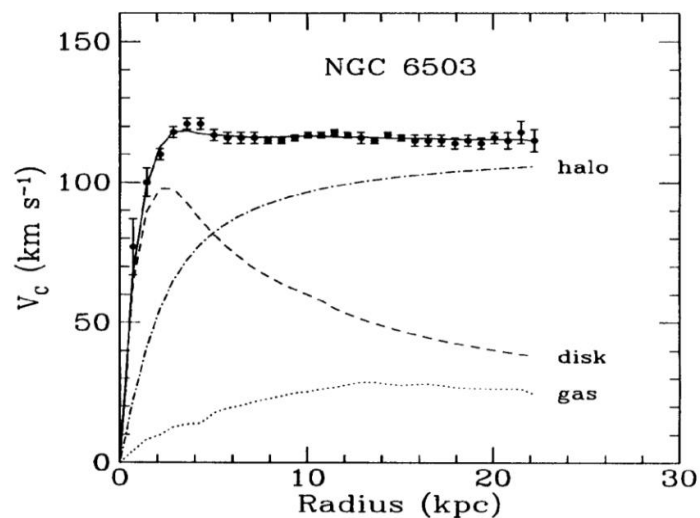
La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)

Evidenze della materia oscura

Curve di rotazione delle galassie



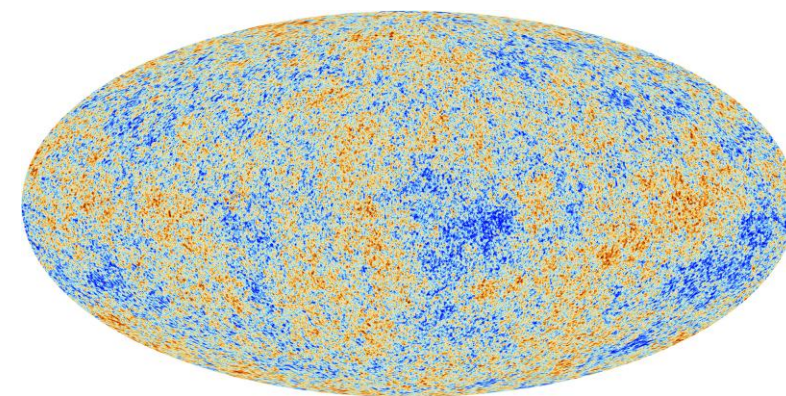
Curve di rotazione di NGC 6503. (*K. G. Begeman et al. “Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics”*)

Effetto di lente gravitazionale



Ammasso di galassie 1E 0657-56, anche chiamato "Bullet Cluster". (*“Astronomy picture of the day”, NASA, 2004*)

Parametri cosmologici

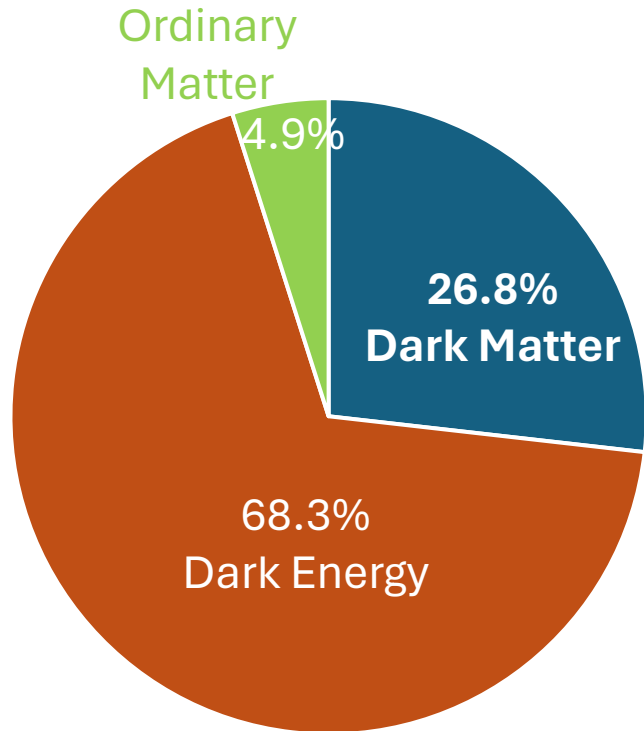


Anisotropie della radiazione cosmica di fondo osservate da Planck. (*ESA and the Planck Collaboration*)

La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)



Caratteristiche della materia oscura:

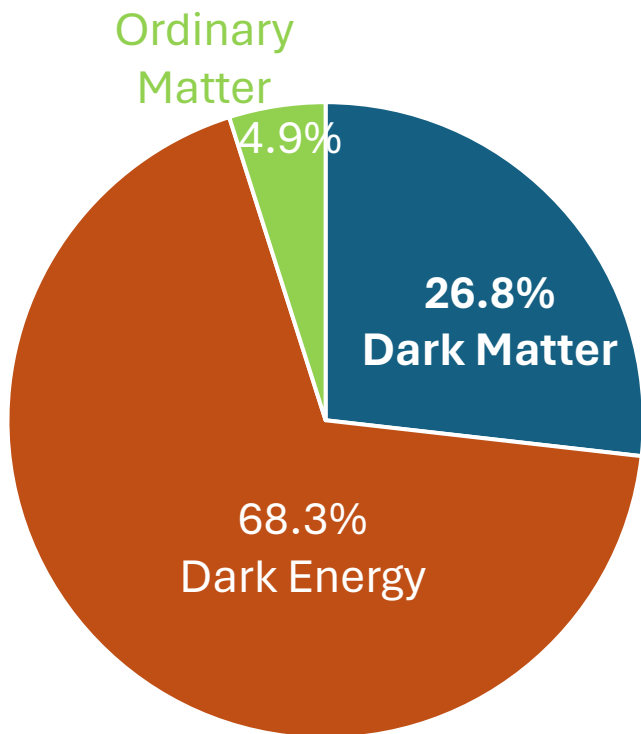
- Debolmente interagente
- Stabile
- Non relativistica

Non siamo a conoscenza di cosa è composta la maggior parte dell'Universo

La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)



Caratteristiche della materia oscura:

- Debolmente interagente
- Stabile
- Non relativistica



WIMP
particella massiva
debolmente interagente

Non siamo a conoscenza di cosa è composta la maggior parte dell'Universo

La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)

Caratteristiche della materia oscura:

- Debolmente interagente
- Stabile
- Non relativistica

Ipotesi



WIMP
particella massiva
debolmente interagente

Rivelazione diretta della materia oscura:

Interazione tra *WIMP* e materia ordinaria di tipo scattering elastico

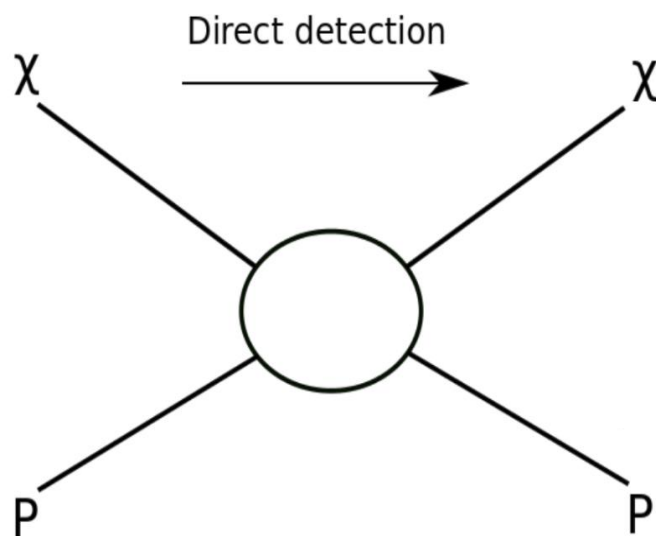


Diagramma di interazione diretta. (T. M. Undagoitia and L. Rauch “Dark matter direct-detection experiments”)

La materia oscura

“If this would be confirmed, we would get the surprising result that dark matter is present in much greater amount than luminous matter.”

Fritz Zwicky (1933)

Caratteristiche della materia oscura:

- Debolmente interagente
- Stabile
- Non relativistica

Ipotesi



WIMP
particella massiva
debolmente interagente

Rivelazione diretta della materia oscura:

Interazione tra *WIMP* e materia ordinaria di tipo scattering elastico

Rivelazione della segnatura d'interazione (luce, carica, calore)

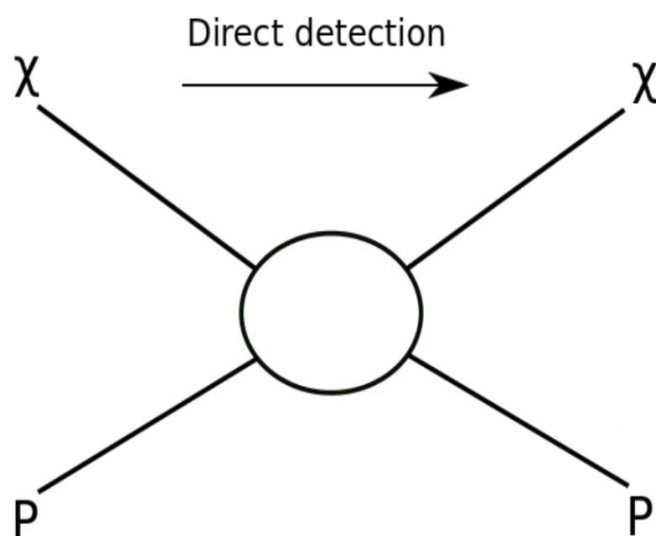
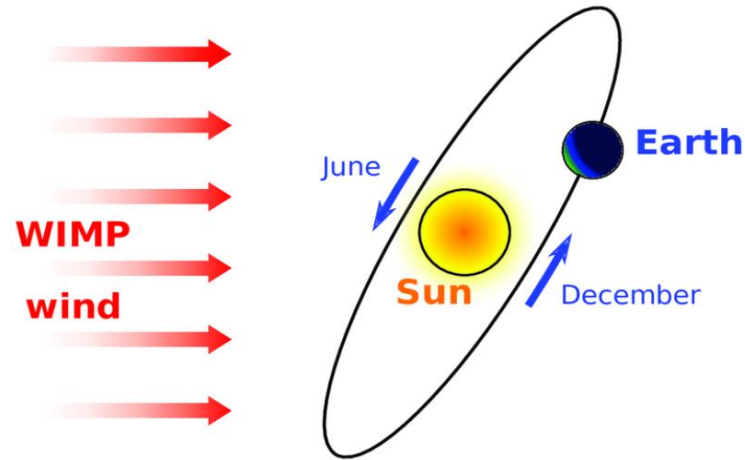


Diagramma di interazione diretta. (T. M. Undagoitia and L. Rauch “Dark matter direct-detection experiments”)

La modulazione annuale

Considerazioni teoriche:

- Alone di materia oscura (distribuzione isotropa)
- Velocità orbitale del Sole rispetto il centro galattico
- Moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole



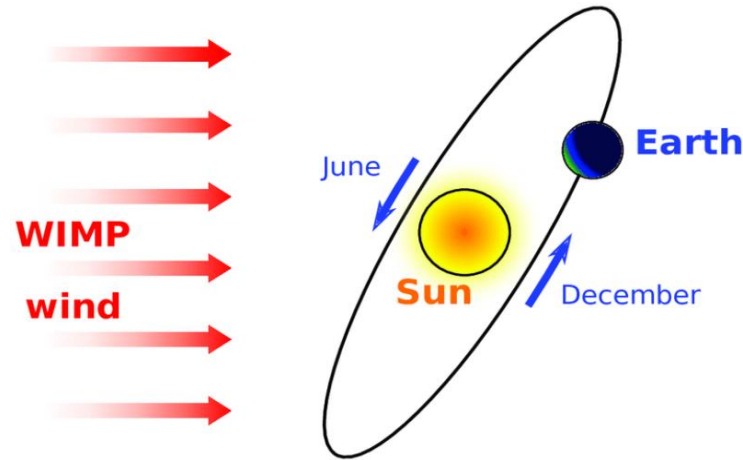
Vento di WIMP rispetto moto della Terra attorno al Sole. (K. Freese et al. "Colloquium: Annual modulation of dark matter")

Un osservatore riceve un vento di WIMP

La modulazione annuale

Considerazioni teoriche:

- Alone di materia oscura (distribuzione isotropa)
- Velocità orbitale del Sole rispetto il centro galattico
- Moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole



Vento di WIMP rispetto moto della Terra attorno al Sole. (K. Freese et al. "Colloquium: Annual modulation of dark matter")

- Somma vettoriale dei contributi

$$v(t) \approx v_{sun} + v_{Earth} \cos[\omega (t - t_0)]$$

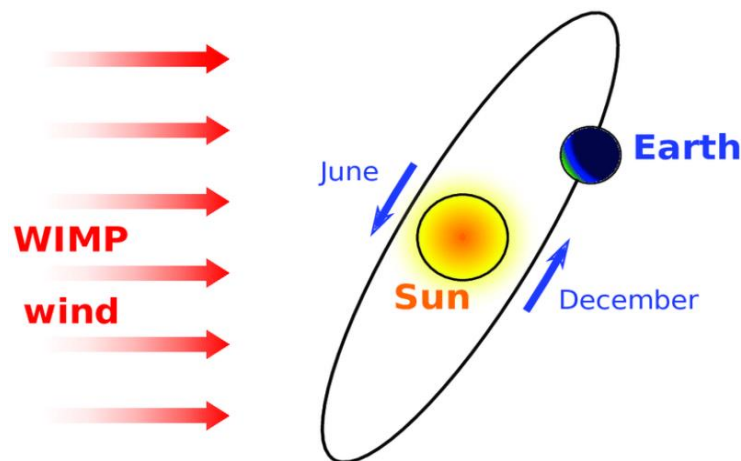
Un osservatore riceve un vento di WIMP

La modulazione annuale del tasso di interazione è una importante prova sperimentale

La modulazione annuale

Considerazioni teoriche:

- Alone di materia oscura (distribuzione isotropa)
- Velocità orbitale del Sole rispetto il centro galattico
- Moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole



Vento di WIMP rispetto moto della Terra attorno al Sole. (K. Freese et al. "Colloquium: Annual modulation of dark matter")

- Somma vettoriale dei contributi

$$v(t) \approx v_{sun} + v_{Earth} \cos[\omega (t - t_0)]$$

Esperimento DAMA/LIBRA

Unico esperimento ad aver rilevato un segnale compatibile con le predizioni teoriche

Un osservatore riceve un vento di WIMP

La modulazione annuale del tasso di interazione è una importante prova sperimentale

La modulazione annuale

Segnale misurato dall'esperimento DAMA/LIBRA-phase 2

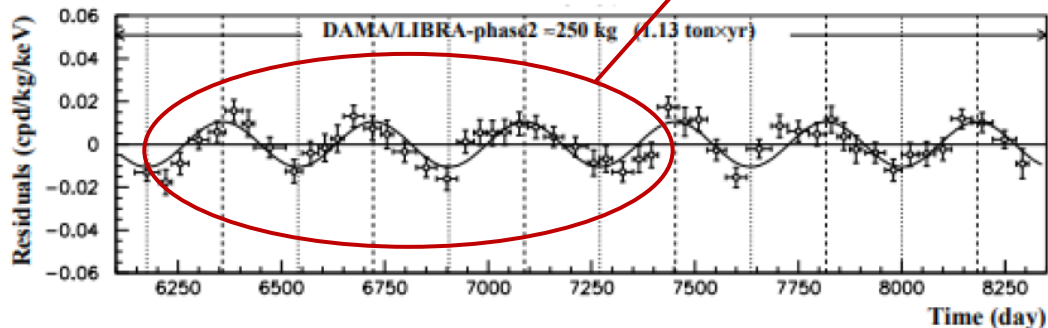
- Massa sensibile: 250 *kg* di cristalli NaI(Tl) radio-puri
- Esposizione: 1.13 *ton* × *anno* (6 anni)
- Lettura tramite PMT
- No rivelatore di veto

La modulazione annuale

Segnale misurato dall'esperimento DAMA/LIBRA-phase 2

- Massa sensibile: 250 *kg* di cristalli NaI(Tl) radio-puri
- Esposizione: 1.13 *ton* × *anno* (6 anni)
- Lettura tramite PMT
- No rivelatore di veto

Fit con la funzione:
 $A \cos[\omega (t - t_0)]$



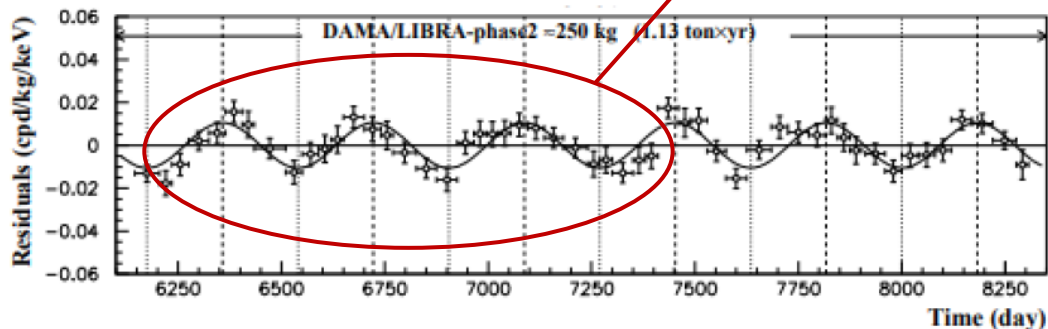
Tasso residuo degli eventi a single-hit nell'intervallo (1 to 6) keV in funzione del tempo. (R. Bernabei et al. "First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase2")

La modulazione annuale

Segnale misurato dall'esperimento DAMA/LIBRA-phase 2

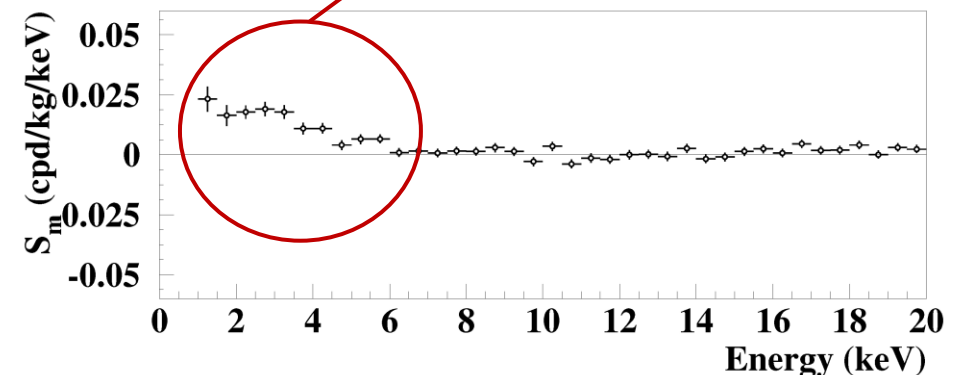
- Massa sensibile: 250 *kg* di cristalli NaI(Tl) radio-puri
- Esposizione: 1.13 *ton* × *anno* (6 anni)
- Lettura tramite PMT
- No rivelatore di veto

Fit con la funzione:
 $A \cos[\omega (t - t_0)]$



Tasso residuo degli eventi a single-hit nell'intervallo (1 to 6) keV in funzione del tempo. (R. Bernabei et al. "First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase2")

Regione di interesse per
il segnale: < 6 keV



Ampiezze di modulazione S_m per l'intero set di dati. (R. Bernabei et al. "First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase2")

I limiti tecnologici

Verifica indipendente del risultato di DAMA/LIBRA

Necessità di nuovi esperimenti con l'utilizzo di scintillatori a NaI(Tl)

Richieste:

- Sensibilità superiore
- Bassa energia di soglia (limite 1 *keV*)
- Riduzione degli eventi di fondo

I limiti tecnologici

Verifica indipendente del risultato di DAMA/LIBRA

Necessità di nuovi esperimenti con l'utilizzo di scintillatori a NaI(Tl)

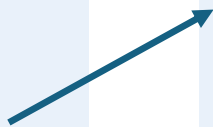
I rivelatori esistenti condividono lo stesso design

Richieste:

- Sensibilità superiore
- Bassa energia di soglia (limite 1 *keV*)
- Riduzione degli eventi di fondo

Cristalli di NaI(Tl) accoppiati a tubi fotomoltiplicatori (PMT) per lettura della luce di scintillazione

- Difficoltà nella produzione di cristalli ultra-puri
- PMT presentano elevato rumore e radioattività



I limiti tecnologici

Verifica indipendente del risultato di DAMA/LIBRA

Necessità di nuovi esperimenti con l'utilizzo di scintillatori a NaI(Tl)

I rivelatori esistenti condividono lo stesso design

Richieste:

- Sensibilità superiore
- Bassa energia di soglia (limite 1 *keV*)
- Riduzione degli eventi di fondo

Cristalli di NaI(Tl) accoppiati a tubi fotomoltiplicatori (PMT) per lettura della luce di scintillazione

- Difficoltà nella produzione di cristalli ultra-puri
- PMT presentano elevato rumore e radioattività

Presenza di un rivelatore di veto

- Utilizzo di scintillatori organici
- Lettura dei segnali dovuti al fondo tramite PMT

Superare gli attuali limiti

Obiettivi:

- Superare la tecnologia a PMT per ridurre fondo intrinseco
- Migliorare efficienza di rivelazione

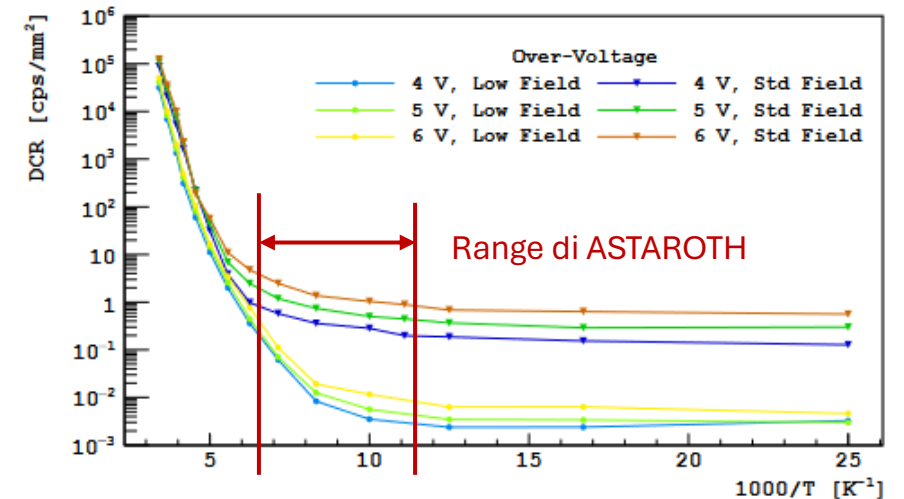
Superare gli attuali limiti

Fotomoltiplicatori al silicio (SiPM) per sostituire PMT

- Array più compatti
- Rumore di buio inferiore rispetto ai PMT a $T < 150 K$
- Radioattività intrinseca inferiore
- SiPM hanno maggiore PDE ($> 50 \%$) alla lunghezza d'onda di scintillazione in NaI(Tl) ($420 nm$) rispetto all'Efficienza Quantica (QE) dei PMT ($30 - 35 \%$)

Obiettivi:

- Superare la tecnologia a PMT per ridurre fondo intrinseco
- Migliorare efficienza di rivelazione



DCR in funzione di over-voltage e $1/T$. (F. Acerbi et al. "Cryogenic Characterization of FBK HD Near-UV Sensitive SiPMs")

Superare gli attuali limiti

Fotomoltiplicatori al silicio (SiPM) per sostituire PMT

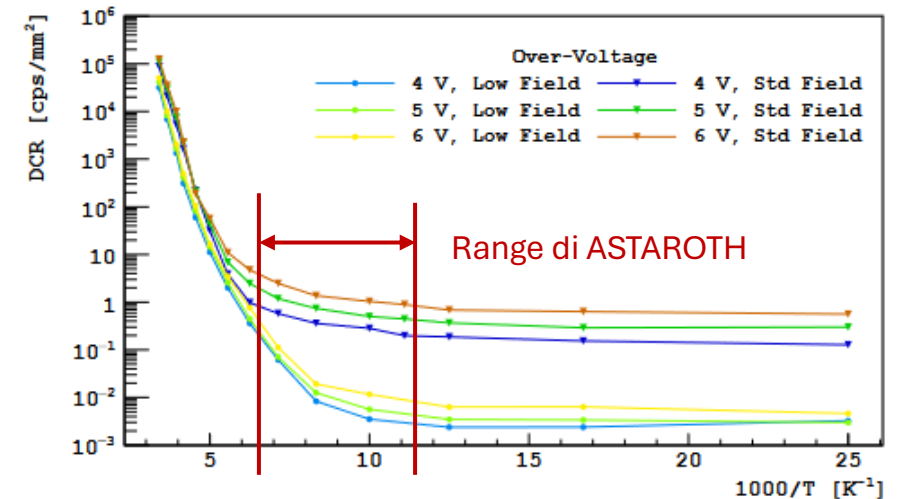
- Array più compatti
- Rumore di buio inferiore rispetto ai PMT a $T < 150 K$
- Radioattività intrinseca inferiore
- SiPM hanno maggiore PDE ($> 50 \%$) alla lunghezza d'onda di scintillazione in NaI(Tl) ($420 nm$) rispetto all'Efficienza Quantica (QE) dei PMT ($30 - 35 \%$)

L'uso di SiPM implica un set-up criogenico

- Argon liquido come materiale refrigerante e come rivelatore di veto (scintillazione a $128 nm$) con lettura tramite fotorivelatori

Obiettivi:

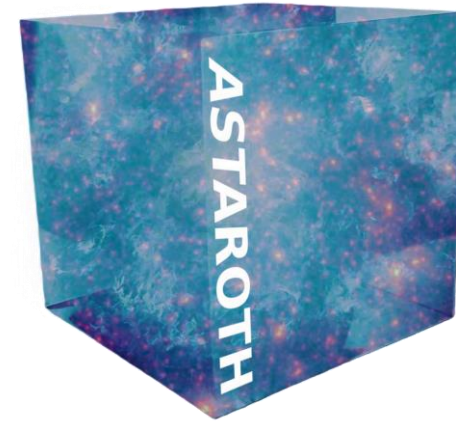
- Superare la tecnologia a PMT per ridurre fondo intrinseco
- Migliorare efficienza di rivelazione



DCR in funzione di over-voltage e $1/T$. (F. Acerbi et al. "Cryogenic Characterization of FBK HD Near-UV Sensitive SiPMs")

Il progetto ASTAROTH

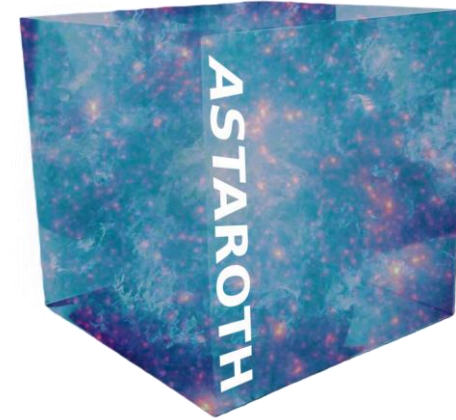
Il progetto **ASTAROTH** propone l'utilizzo di cristalli cubici di NaI(Tl) da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ con matrici di SiPM sulle sei facce, da caratterizzare nel range di temperatura $87 - 150 \text{ K}$



Il progetto ASTAROTH

Il progetto **ASTAROTH** propone l'utilizzo di cristalli cubici di NaI(Tl) da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ con matrici di SiPM sulle sei facce, da caratterizzare nel range di temperatura $87 - 150 \text{ K}$

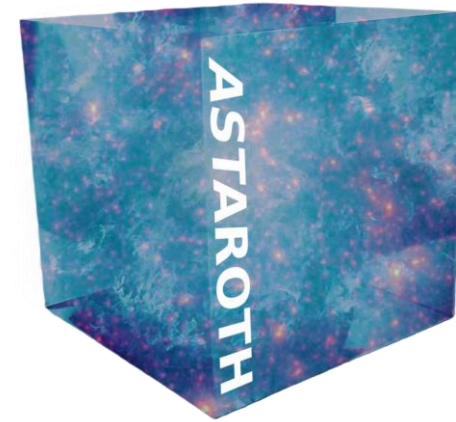
- Scelta di **cristalli incapsulati** per semplificare manipolazione e installazione



Il progetto ASTAROTH

Il progetto **ASTAROTH** propone l'utilizzo di cristalli cubici di NaI(Tl) da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ con matrici di **SiPM** sulle sei facce, da caratterizzare nel range di temperatura $87 - 150 \text{ K}$

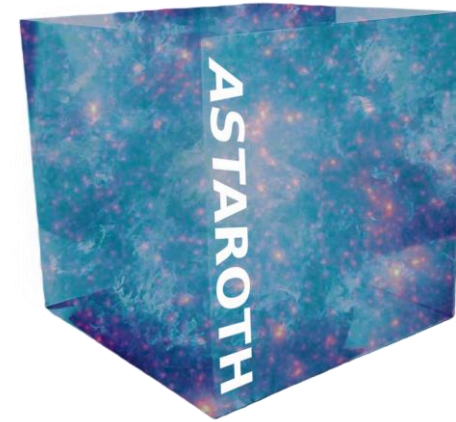
- Scelta di **cristalli incapsulati** per semplificare manipolazione e installazione
- Utilizzo di **SiPM** per migliori prestazioni
 - Copertura su ogni faccia, no riflettori



Il progetto ASTAROTH

Il progetto **ASTAROTH** propone l'utilizzo di cristalli cubici di NaI(Tl) da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ con matrici di **SiPM** sulle sei facce, da caratterizzare nel range di temperatura $87 - 150 \text{ K}$

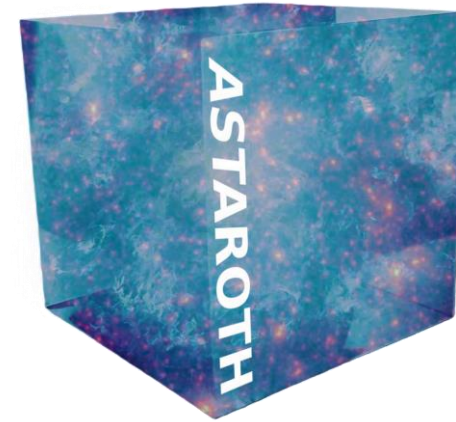
- Scelta di **cristalli incapsulati** per semplificare manipolazione e installazione
- Utilizzo di **SiPM** per migliori prestazioni
 - Copertura su ogni faccia, no riflettori
- Caratterizzazione della **risposta in temperatura** di SiPM e cristalli, nel range indicato in precedenza, per trovare il punto di lavoro ottimale
 - Risposta in temperatura da investigare



Il progetto ASTAROTH

Il progetto **ASTAROTH** propone l'utilizzo di cristalli cubici di NaI(Tl) da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^2$ con matrici di **SiPM** sulle sei facce, da caratterizzare nel range di temperatura $87 - 150 \text{ K}$

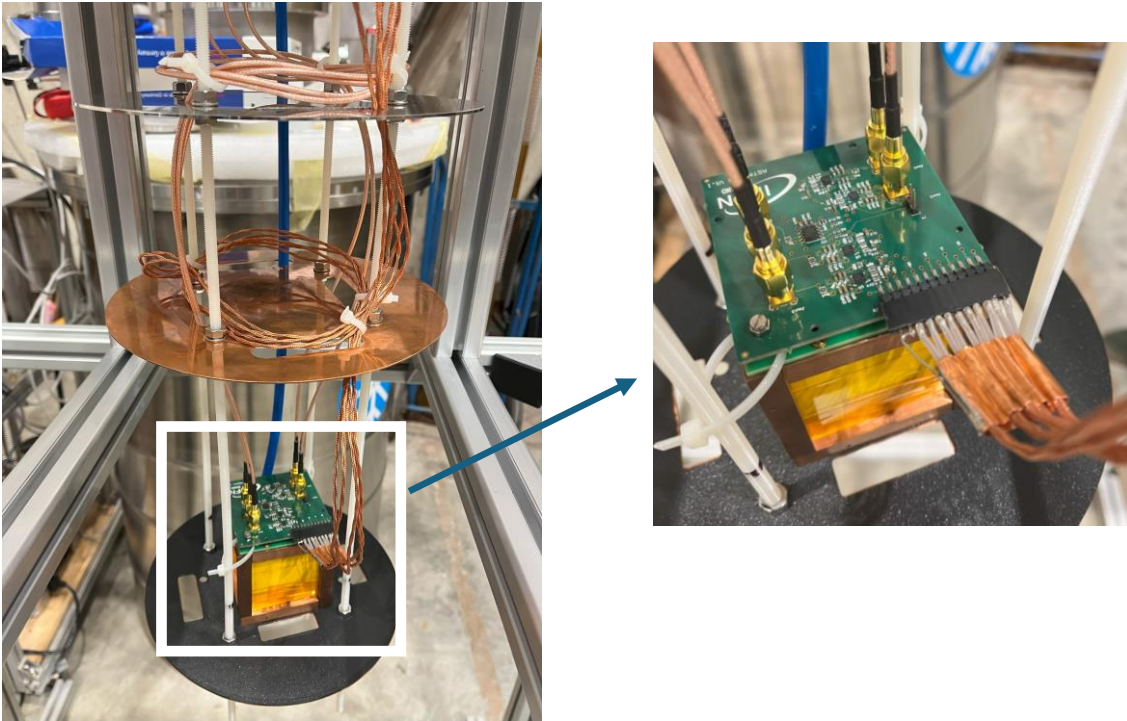
- Scelta di **cristalli incapsulati** per semplificare manipolazione e installazione
- Utilizzo di **SiPM** per migliori prestazioni
 - Copertura su ogni faccia, no riflettori
- Caratterizzazione della **risposta in temperatura** di SiPM e cristalli, nel range indicato in precedenza, per trovare il punto di lavoro ottimale
 - Risposta in temperatura da investigare
- Sviluppo di un **ASIC** di front-end per **lettura e conversione analogico-digitale del segnale**
 - informazione geografica dei singoli pixel illuminati ed eliminazione del fondo grazie a comparatore di soglia programmabile



Caratterizzazione nel criostato: set-up

Caratterizzazione nel dimostratore

Foto della struttura di supporto all'interno del criostato con cristallo, SiPM e front-end

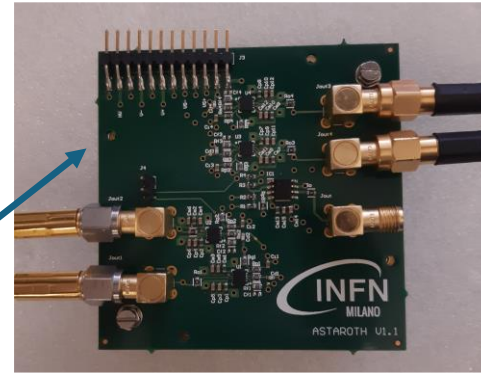
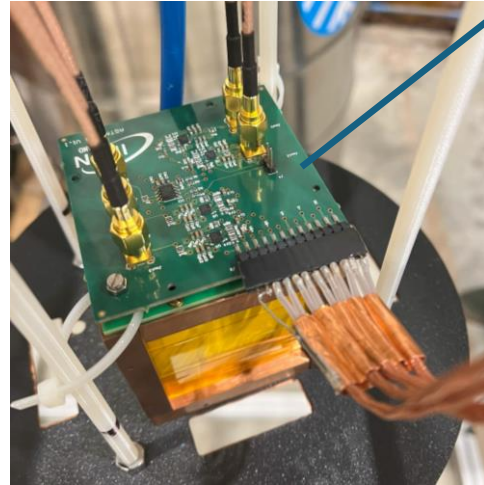
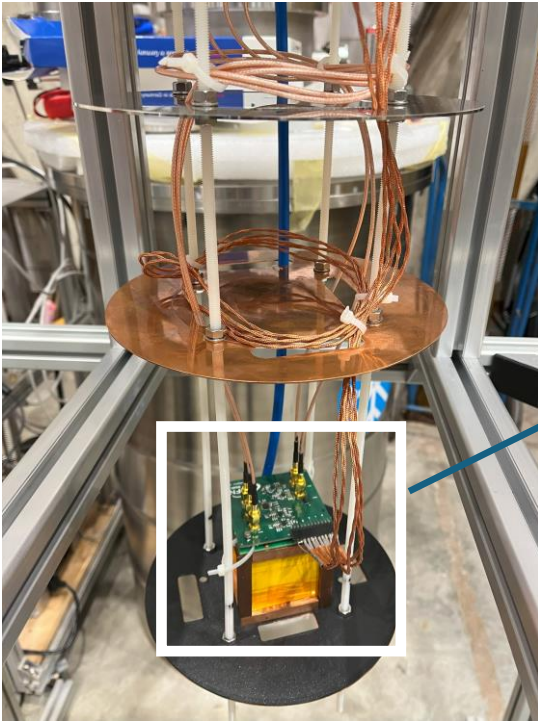


Lavoro svolto presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

Caratterizzazione nel criostato: set-up

Caratterizzazione nel dimostratore

Foto della struttura di supporto all'interno del criostato con cristallo, SiPM e front-end



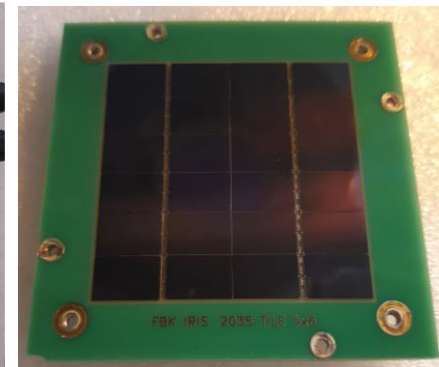
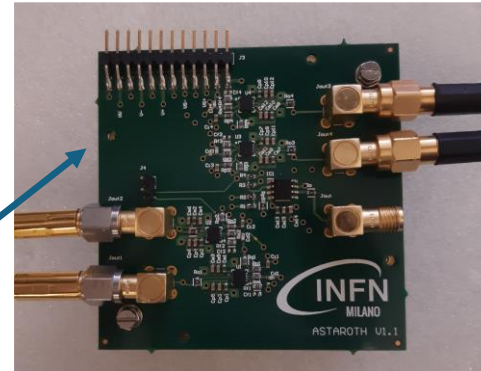
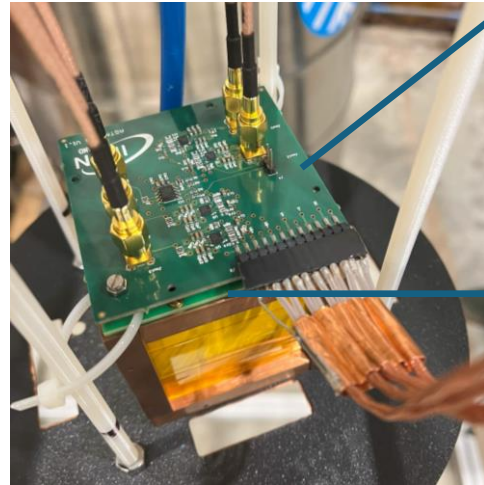
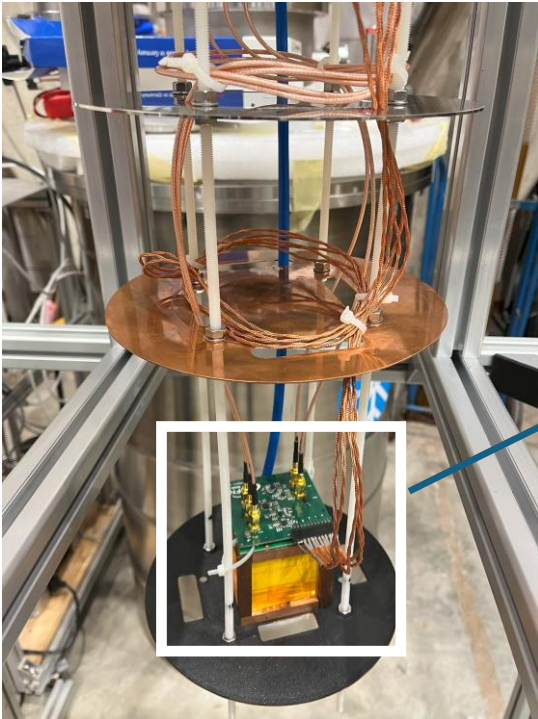
Circuito di front-end per lettura del segnale,

Lavoro svolto presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

Caratterizzazione nel criostato: set-up

Caratterizzazione nel dimostratore

Foto della struttura di supporto all'interno del criostato con cristallo, SiPM e front-end



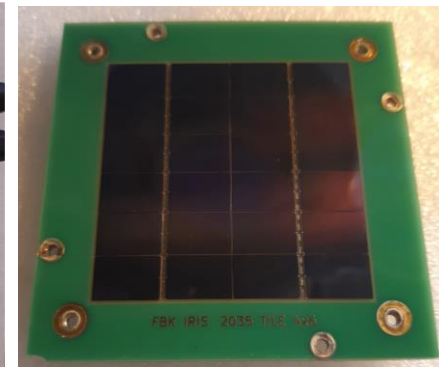
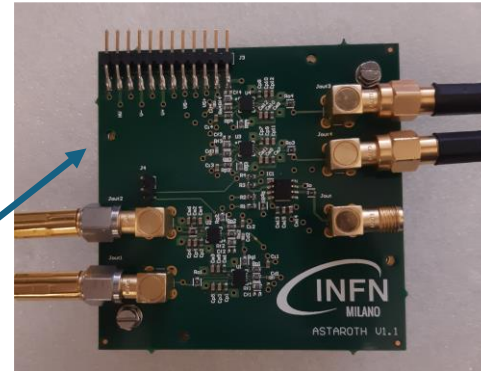
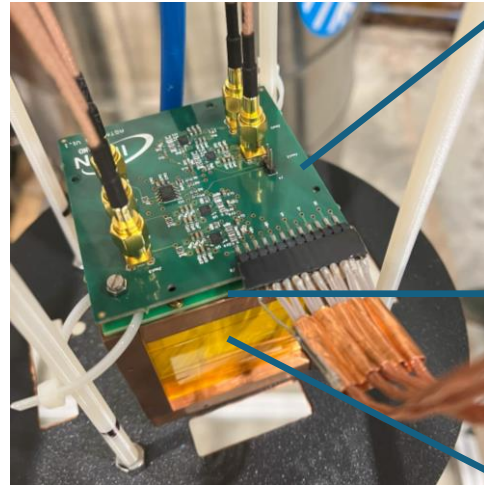
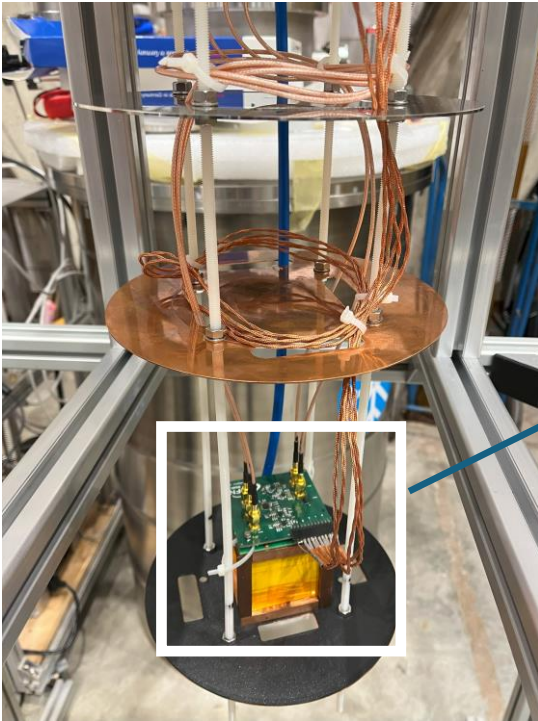
Circuito di front-end per lettura del segnale, tile di SiPM

Lavoro svolto presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

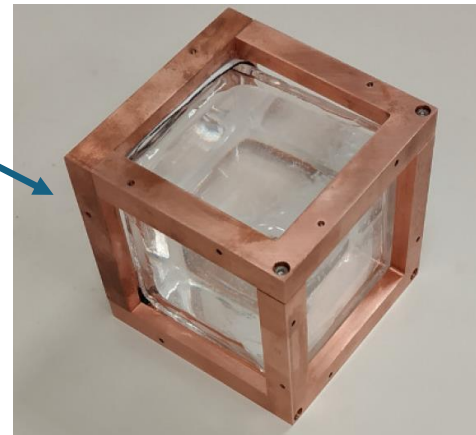
Caratterizzazione nel criostato: set-up

Caratterizzazione nel dimostratore

Foto della struttura di supporto all'interno del criostato con cristallo, SiPM e front-end



Circuito di front-end per lettura del segnale, tile di SiPM



Cristallo di NaI(Tl) incapsulato in quarzo con supporto in rame

Lavoro svolto presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

Caratterizzazione con laser: set-up

Caratterizzazione preliminare dei SiPM e del circuito di front-end in laboratorio (no cristallo)

- **Utilizzo di laser (trasporto tramite fibra ottica)**
 - Fibra ottica posta a 2 *cm* di distanza dalla tile di SiPM e laser impulsato a 10 *Hz*
 - Scelto come trigger esterno sull'oscilloscopio durante l'acquisizione delle forme d'onda
- **Immersione diretta in azoto liquido ($T = 77K$)**
- **Lettura del segnale di uscita dal circuito di front-end per ogni quadrante della tile di SiPM (4 canali di uscita + canale di somma)**

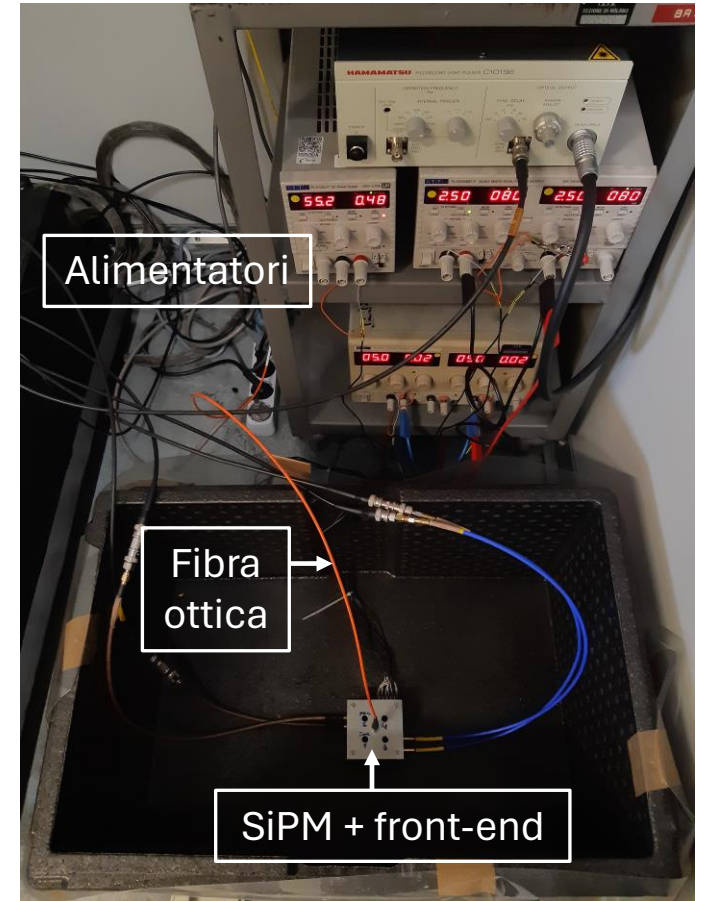
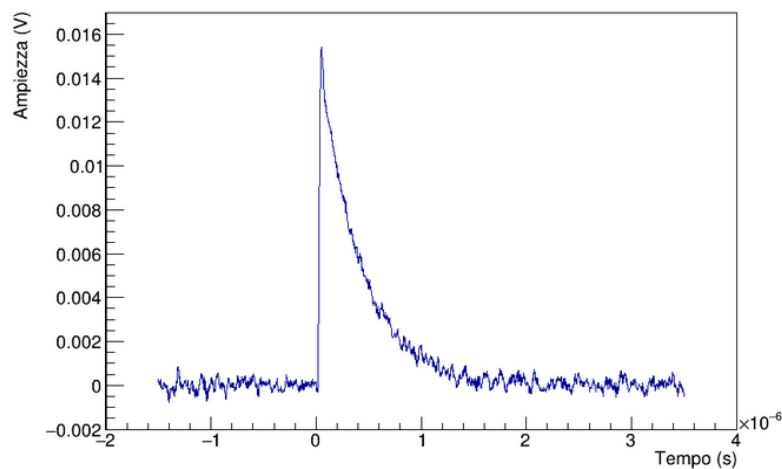


Foto del set-up sperimentale. (N. Gallice “Cryogenic detection of scintillation light with large area SiPM arrays for next generation neutrino and dark matter experiments”)

Caratterizzazione con laser: risultati

La risposta è proporzionale al numero di fotoni rivelati, il rapporto tra fotoni incidenti e rivelati è dato dalla PDE

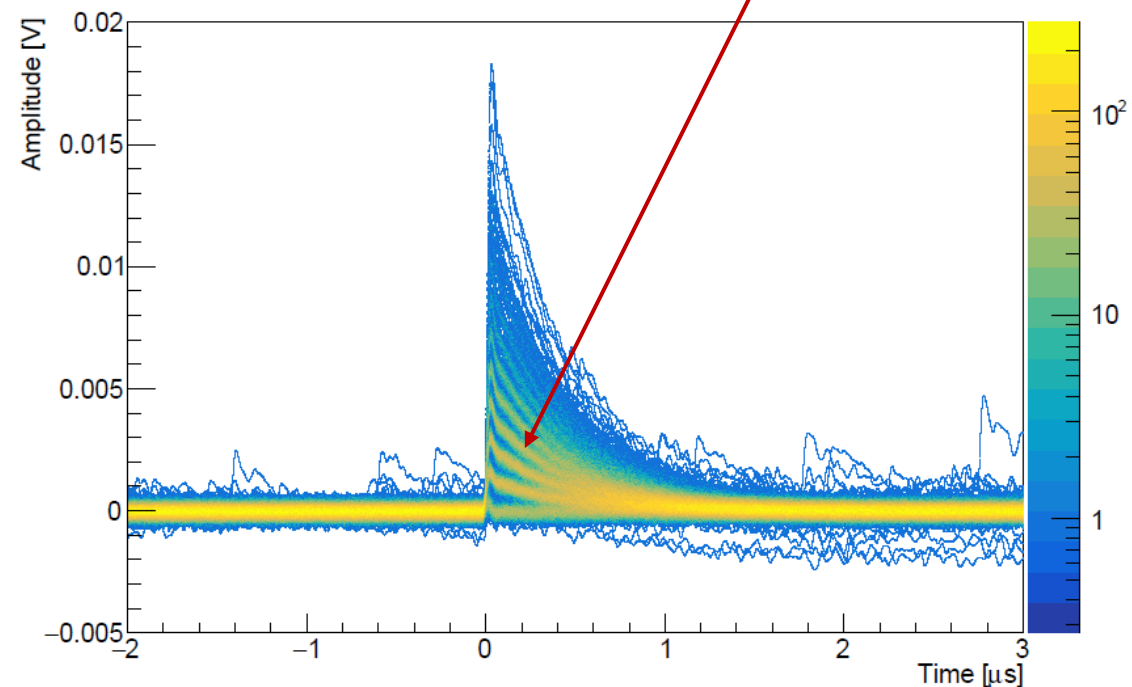
Studio della risposta dei SiPM in funzione della tensione di alimentazione, espressa come eccesso rispetto al valore di breakdown (over-voltage)



Segnale in uscita dal front-end invertito (segnali negativi da SiPM)

Forma d'onda con baseline sottratta. (M. Galli "Development and characterisation of detectors based on ultra-high purity NaI(Tl) crystals for direct search of Dark Matter")

La risposta risulta quantizzata e proporzionale al numero di fotoni rivelati



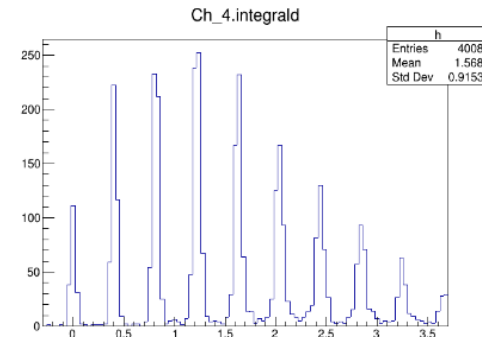
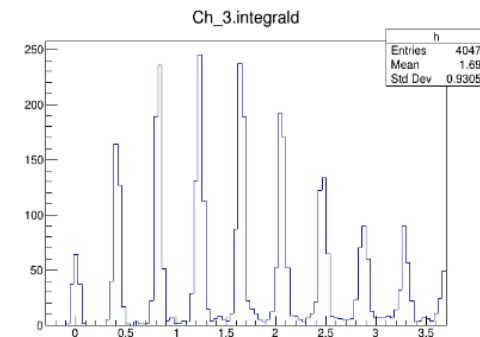
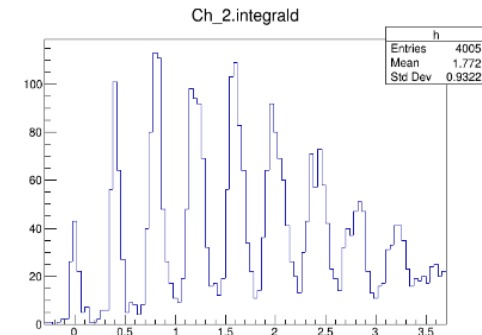
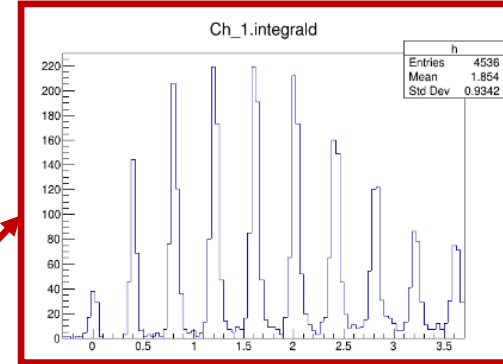
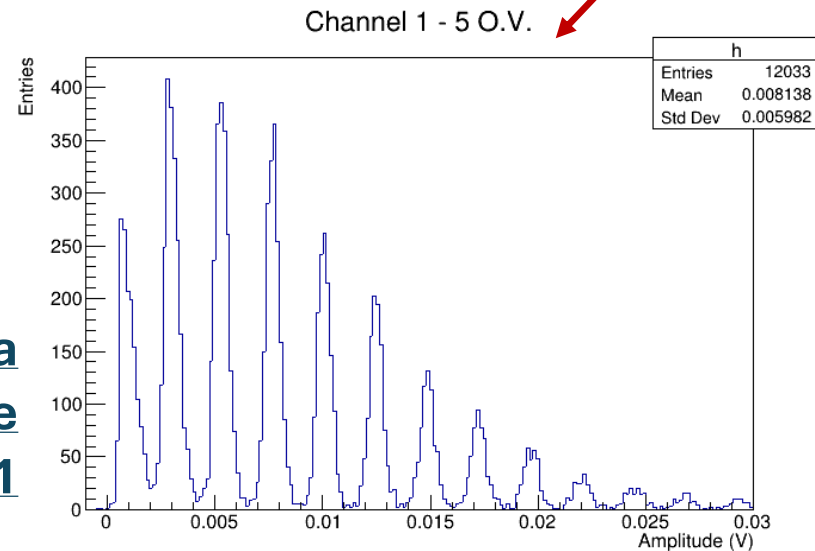
Segnale letto con un oscilloscopio in modalità persistenza, canale 1 a 3 V di over-voltage. (N. Gallice "Cryogenic detection of scintillation light with large area SiPM arrays for next generation neutrino and dark matter experiments")

Caratterizzazione con laser: risultati

Un singolo fotone attiva un processo che rilascia una certa quantità di carica ed è un multiplo della carica di un singolo fotone

La distribuzione dei picchi è ben visibile con 5 V di over-voltage per tutti i canali

Distribuzione della
ampiezza del segnale
per il canale 1



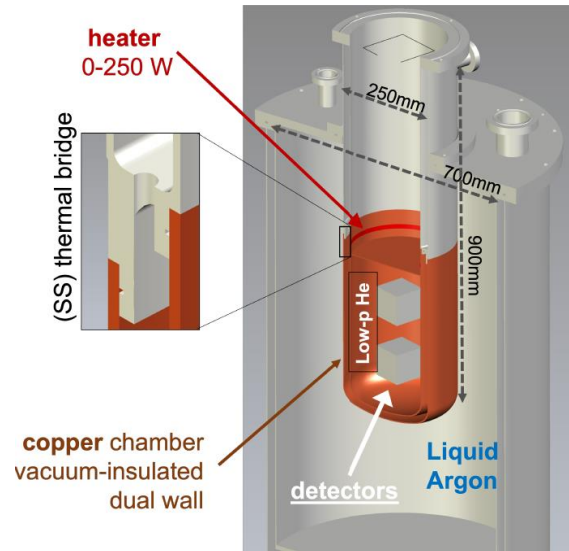
Distribuzione di carica

Analisi delle forme d'onda acquisite su canale 1 a 5 V di over-voltage. (M. Galli "Development and characterisation of detectors based on ultra-high purity NaI(Tl) crystals for direct search of Dark Matter")

Design del criostato

Richiesta:

Ambiente stabile per i cristalli di NaI(Tl) e per l'elettronica di lettura



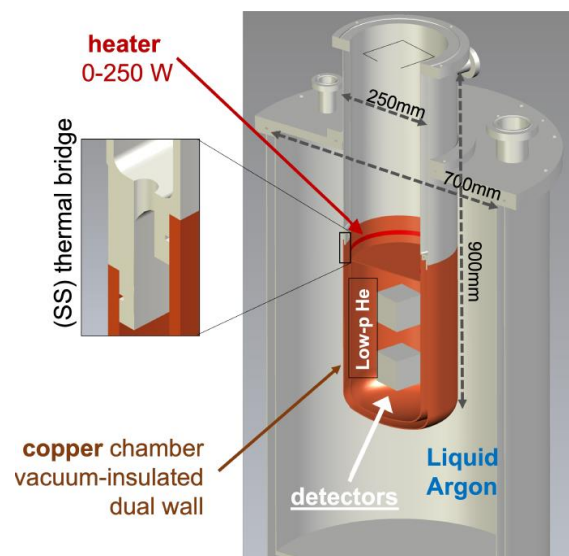
- Camera interna **in rame radio-puro a doppia parete** con intercapedine predisposta al vuoto
- Presenza di **ponte termico in acciaio inossidabile** per raffreddamento graduale
- Camera immersa in **LAr**
- Utilizzo di un **heater** per stabilizzare la temperatura interna
- Presenza **gas di He a pressione ambientale** nella camera interna per trasporto di calore ai cristalli

Modello CAD del criostato di ASTAROTH. (D. D'Angelo et al. "The ASTAROTH project")

Design del criostato

Richiesta:

Ambiente stabile per i cristalli di NaI(Tl) e per l'elettronica di lettura



- Camera interna in **rame radio-puro a doppia parete** con intercapedine predisposta al vuoto
- Presenza di **ponte termico in acciaio inossidabile** per raffreddamento graduale
- Camera immersa in **LAr**
- Utilizzo di un **heater** per stabilizzare la temperatura interna
- Presenza **gas di He a pressione ambientale** nella camera interna per trasporto di calore ai cristalli

Dimostratore del progetto ASTAROTH attualmente in funzione

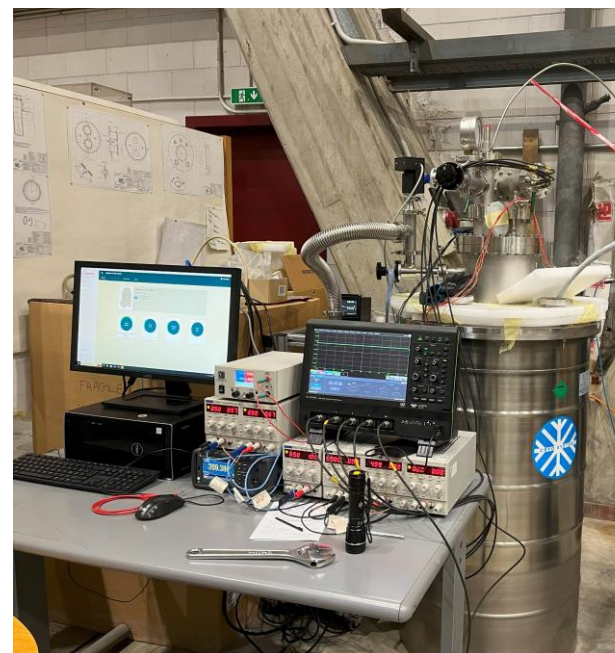
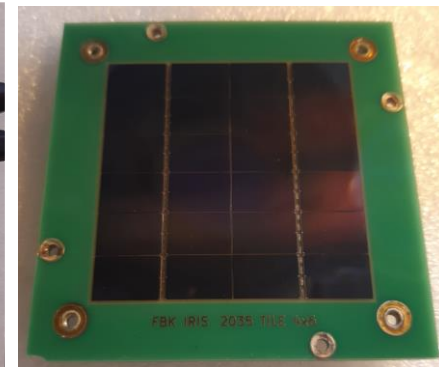
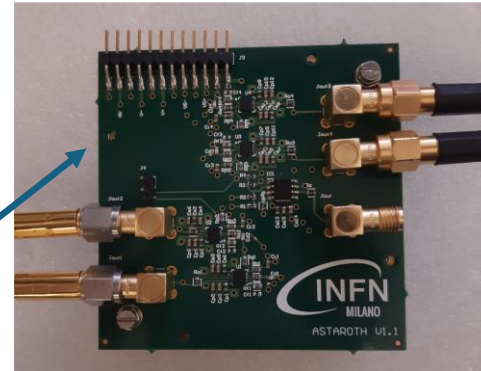
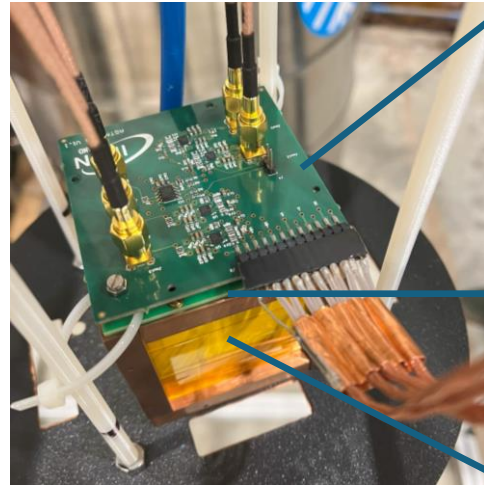
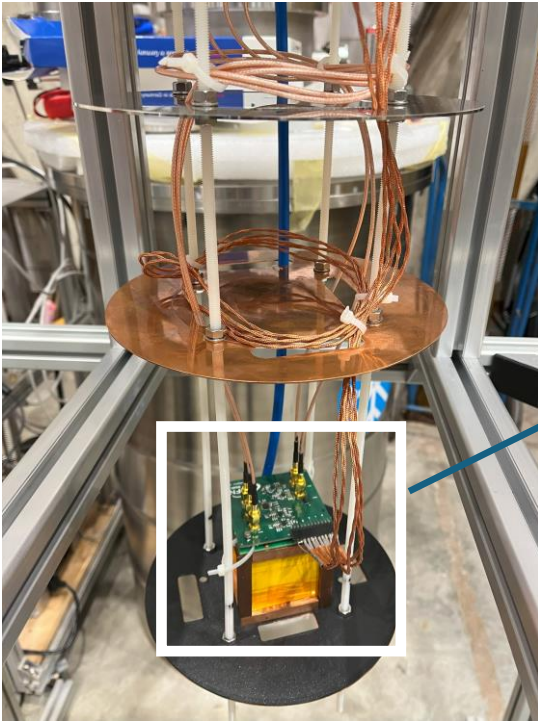


Foto del criostato e set-up sperimentale presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

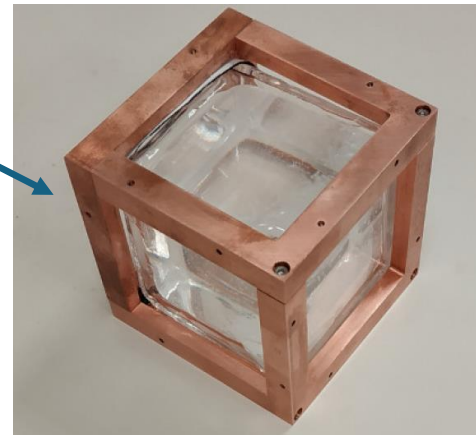
Caratterizzazione nel criostato: set-up

Caratterizzazione nel dimostratore

Foto della struttura di supporto all'interno del criostato con cristallo, SiPM e front-end



Circuito di front-end per lettura del segnale, tile di SiPM



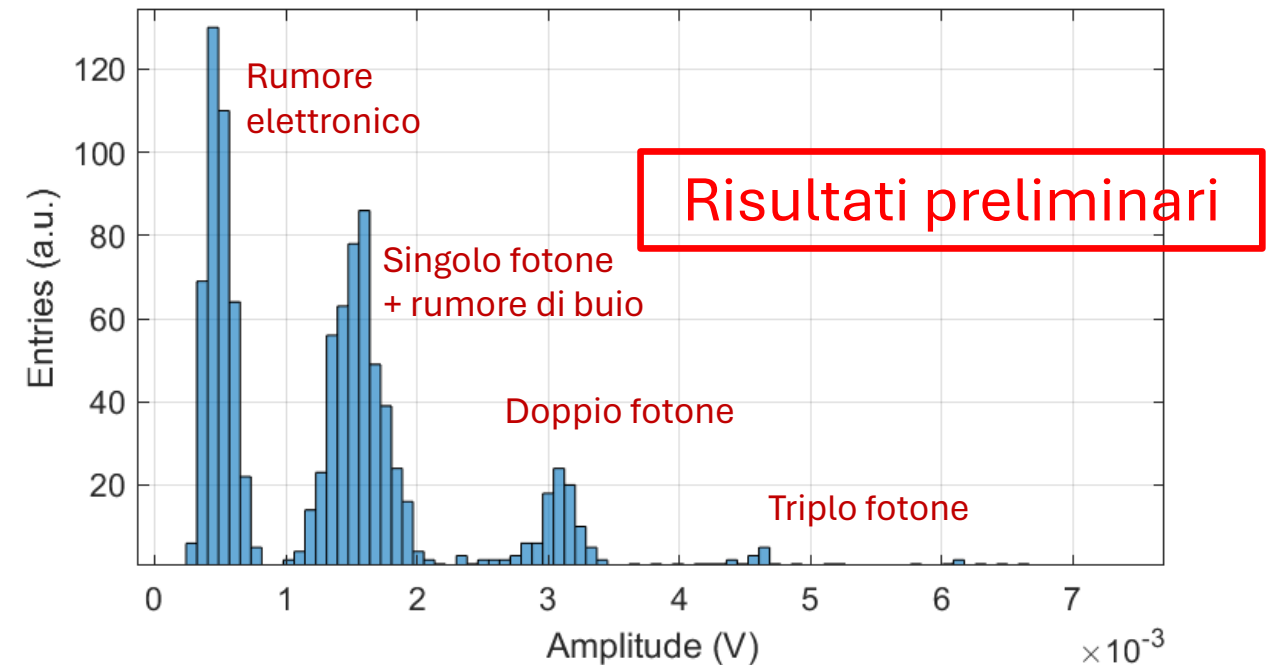
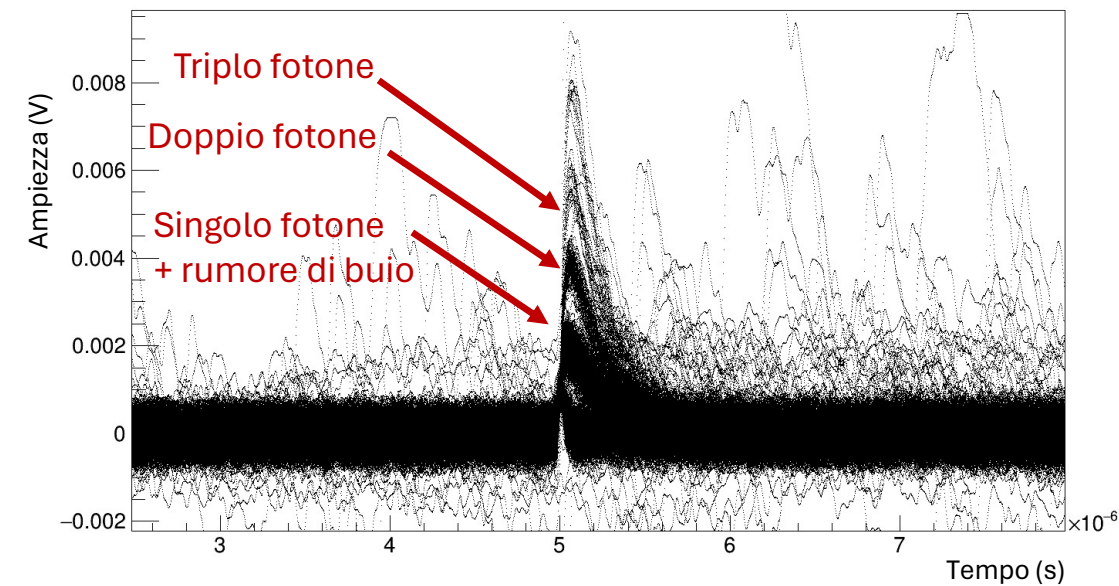
Cristallo di NaI(Tl) incapsulato in quarzo con supporto in rame

Lavoro svolto presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'INFN - Milano

Caratterizzazione nel criostato: risultati

- Temperatura raggiunta nella camera interna: $T = 200\text{ K}$
- $V_{\text{over-voltage}} = 5\text{ V}$
- Trigger : 1.2 mV

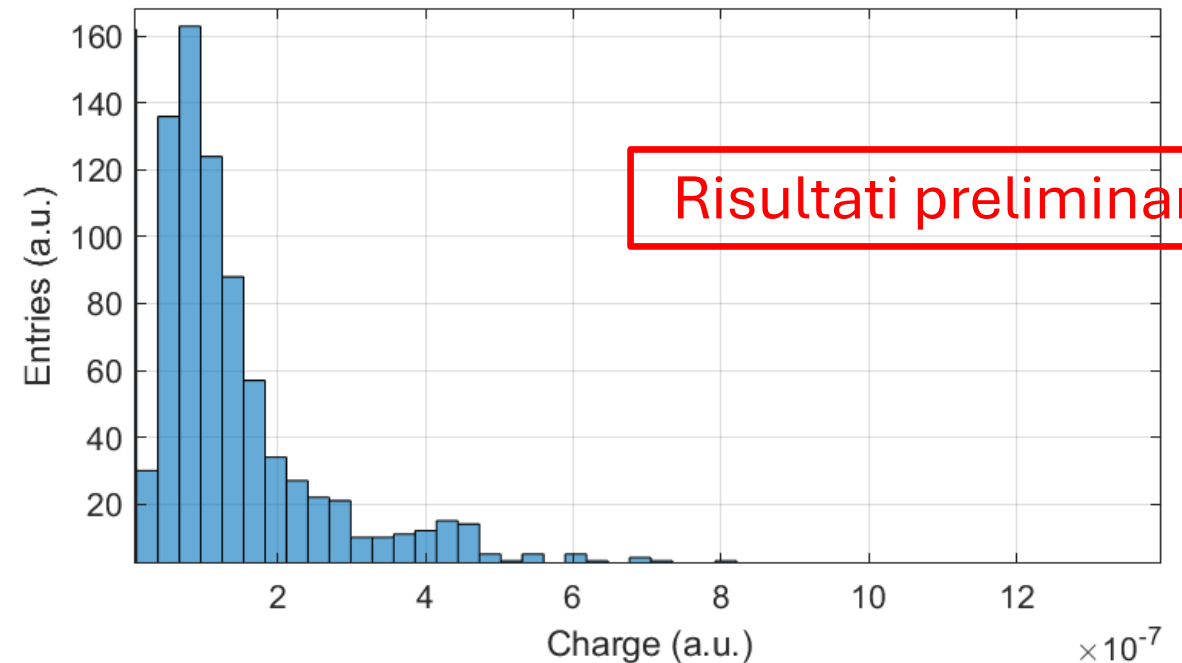
Distribuzione della ampiezza del segnale per il canale 1



Caratterizzazione nel criostato: risultati

- Temperatura raggiunta nella camera interna: $T = 200\text{ K}$
- $V_{\text{over-voltage}} = 5\text{ V}$
- Trigger : 2 mV

Distribuzione di carica (integrale del segnale) per il canale 1



Conclusioni e sviluppi futuri

- Il progetto **ASTAROTH** si pone l'obiettivo di abbassare l'attuale limite presente negli esperimenti di rivelazione diretta di materia oscura, permettendo così di indagare il segnale di modulazione annuale nella regione al di sotto di 1 keV
- Si è scelta una innovativa introduzione di **SiPM per la lettura di cristalli di NaI(Tl) a temperatura criogenica** per superare gli attuali limiti tecnologici
- Il **criostato** in funzione permette una variazione di temperatura da 82 K a 200 K (testato) e grazie alla presenza dell'heater si ottiene un punto di temperatura stabile per studiare la risposta di cristalli cubici da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ inseriti nella camera interna

Conclusioni e sviluppi futuri

- Il progetto **ASTAROTH** si pone l'obiettivo di abbassare l'attuale limite presente negli esperimenti di rivelazione diretta di materia oscura, permettendo così di indagare il segnale di modulazione annuale nella regione al di sotto di 1 keV
- Si è scelta una innovativa introduzione di **SiPM per la lettura di cristalli di NaI(Tl) a temperatura criogenica** per superare gli attuali limiti tecnologici
- Il **criostato** in funzione permette una variazione di temperatura da 82 K a 200 K (testato) e grazie alla presenza dell'heater si ottiene un punto di temperatura stabile per studiare la risposta di cristalli cubici da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ inseriti nella camera interna

Attualmente in corso la prima campagna di misure per la caratterizzazione di un cristallo di NaI(Tl) associato a una tile di SiPM FBK e circuito di front-end. Successivamente, misura con sorgente radioattiva per validare la capacità del sistema di rivelare la scintillazione e calibrare l'ampiezza del segnale con l'energia della radiazione

In studio la risposta di circuiti integrati a temperatura criogenica per lo sviluppo di un ASIC di front-end per lettura e digitalizzazione del segnale