

Un calorimetro adronico basato su micropattern gaseous detector resistivi

Incontri di Fisica delle Alte Energie 2025

Cagliari, 11-04-2025

Lisa Generoso¹, A. Zaza¹, A. Colaleo¹, A. Stamerra¹, A. Pellicchia¹, D. Zavazieva², F. M. Simone¹, G. Sekhniaidze³, L. Moleri², L. Longo¹, M. Alviggi³, M. Bianco⁴, M. Biglietti⁵, M. Della Pietra³, M. Maggi¹, M. Buonsante¹, M. T. Camerlingo¹, M. Borysova², M. Iodice⁵, P. Iengo³, P. Verwilligen¹, R. Di Nardo⁵, R. Radogna¹, R. Venditti¹, L. Scharenberg⁴, E. Oliveri⁴, K. Flöthner⁴

¹University & INFN of Bari – Italy ²Weizmann Institute of Science – Israel ³University Federico II and INFN Naples – Italy ⁴CERN, Geneva – Switzerland ⁵INFN Roma Tre – Italy

MPGD-HCAL

Calorimetria ai Futuri Collider di Particelle



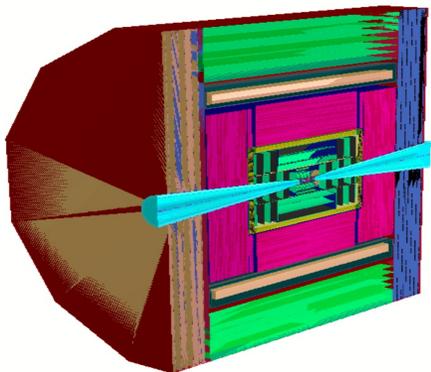
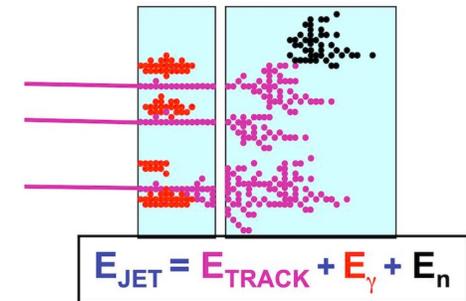
OBIETTIVI

Risoluzione energetica dei jet < 3%-4% per separazione Z/H, ottenibile con un **approccio Particle Flow**:

- Alta granularità per distinguere i costituenti del jet, ottimizzando matching calorimetro-tracciatore
- L'energia di ogni costituente è misurata con il rivelatore più performante

Calorimetro 5D → (E, x, y, z, t)

- Sfruttamento della topologia dei depositi
- Timing di precisione per reiezione fondo e miglioramento della ricostruzione della shower



PROPOSTA

Progetto inserito nel contesto delle collaborazioni **DRD6/DRD1** e supportato da PNRR Calorhino

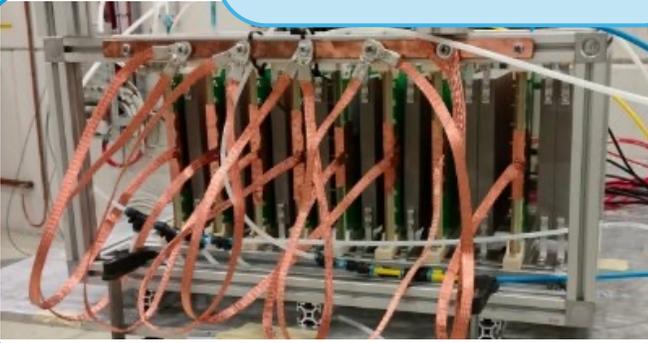
CALORIMETRO ADRONICO A SAMPLING PER ESPERIMENTI NEI FUTURI COLLIDER LEPTONICI CIRCOLARI (Muon Collider, FCC-ee ...)

- Resistive Micro Pattern Gaseous Detector (MPGD)** come strati attivi (con miscela di gas a base di Argon)
- Ferro come materiale assorbitore

MPGD-HCAL

Un calorimetro adronico basato su MPGD resistivi

PROTOTIPO DI HCAL



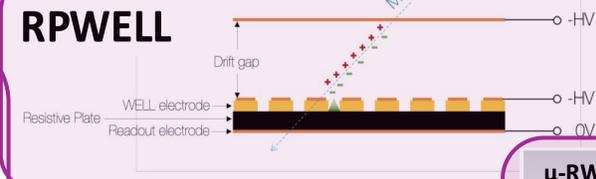
Read-out basato su MPGD

- **Alta granularità** (fino a $1 \times 1 \text{ cm}^2$) per la calorimetria **Particle Flow**
- +
- Resistenza alle radiazioni fino a diversi C/cm^2
- Risoluzione temporale di $\text{O}(\text{ns})$
- Segmentazione longitudinale
- Alta rate-capability $\text{O}(\text{MHz}/\text{cm}^2)$
- Soluzione economica per instrumentare grandi superfici

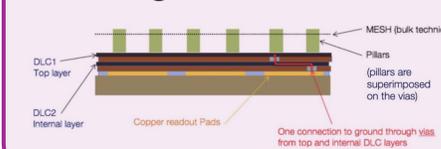
PROGETTO

- Confronto tra :
 - 3 tecnologie MPGD (**MicroMegas** resistive, **μ RWELL** e **RPWELL**)
 - diversi chip di read-out
- Studio della risoluzione in energia e del timing tramite:
 - simulazioni MC
 - campagne di test beam (TB)

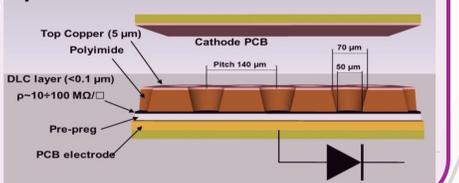
RPWELL

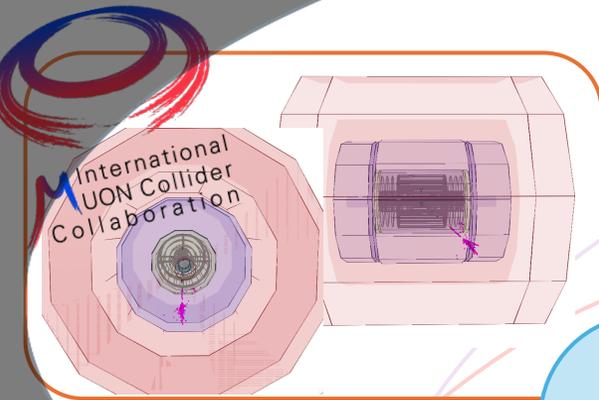


MicroMegas

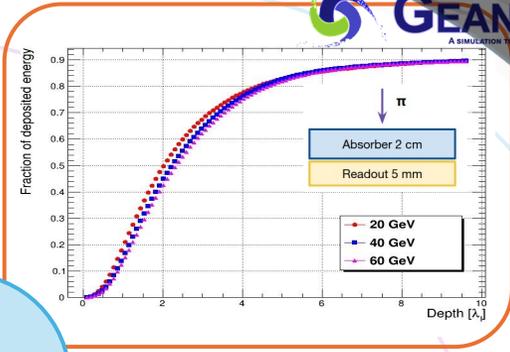


μ -RWELL





determina i requisiti di fisica per



SIMULAZIONE NEL FRAMEWORK DEL MUON COLLIDER

SIMULAZIONE GEANT4 STANDALONE DEL CALORIMETRO

Strategia di R&D per MPGD-HCAL

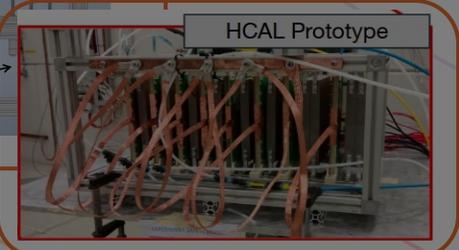
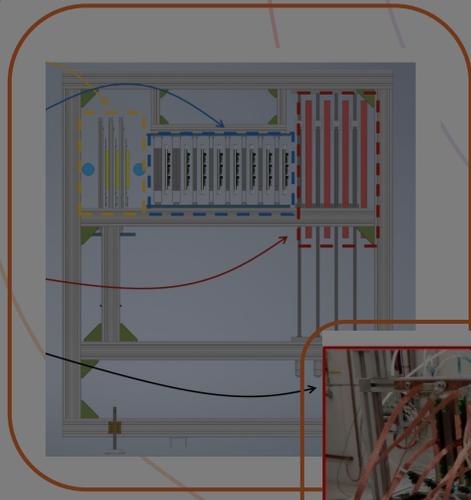
determina le prestazioni per

Definisce le caratteristiche di design per

DESIGN E TEST DEL PROTOTIPO DI UNA CELLA CALORIMETRICA

SVILUPPO DI TECNOLOGIE A MPGD

usate nel

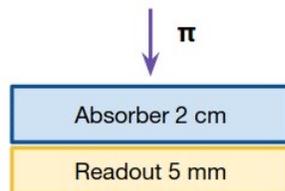


SIMULAZIONI

Gun monocromatiche di pioni carichi fino a 100 GeV

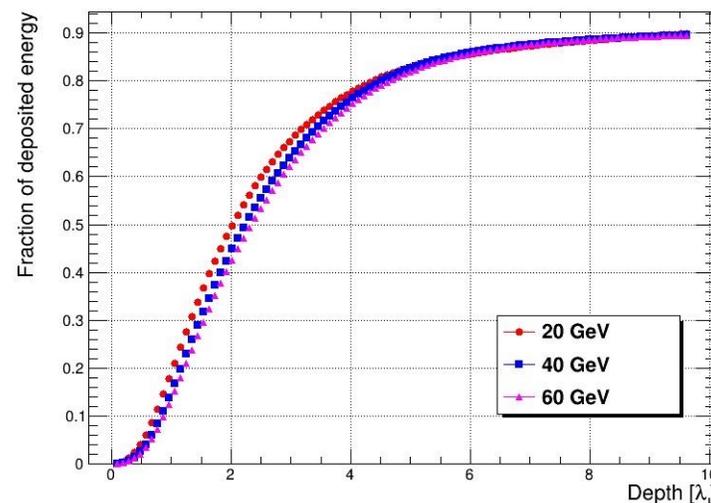
Contenimento della shower in Geant4

- Geometria del singolo strato:
 - 2 cm di ferro come assorbitore
 - 5 mm di gas (Ar/CO₂)
- Granularità delle pad di readout 1x1 cm²



Risultato: contenimento longitudinale in 10 λ (lunghezza di interazione nucleare) e trasversale in 3 λ

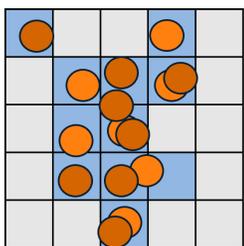
→ contenimento atteso nel Muon Collider : ~ 80% (3 TeV), 85% (10 TeV)



Risoluzione energetica nel framework del Muon Collider a 3 TeV

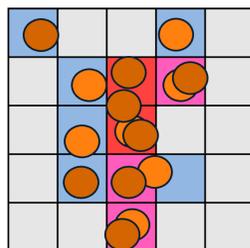
READOUT DIGITALE

$$E_{cluster} = f(N_{hits})$$

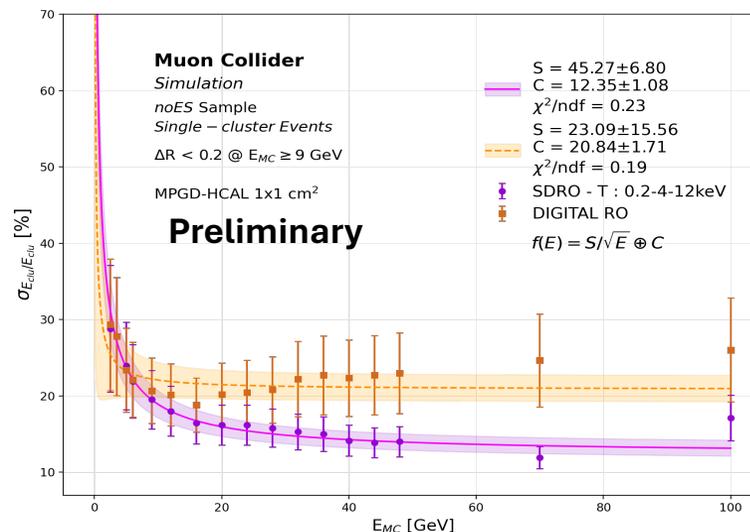


READOUT SEMIDIGITALE

$$E_{cluster} = \alpha N_1 + \beta N_2 + \gamma N_3$$

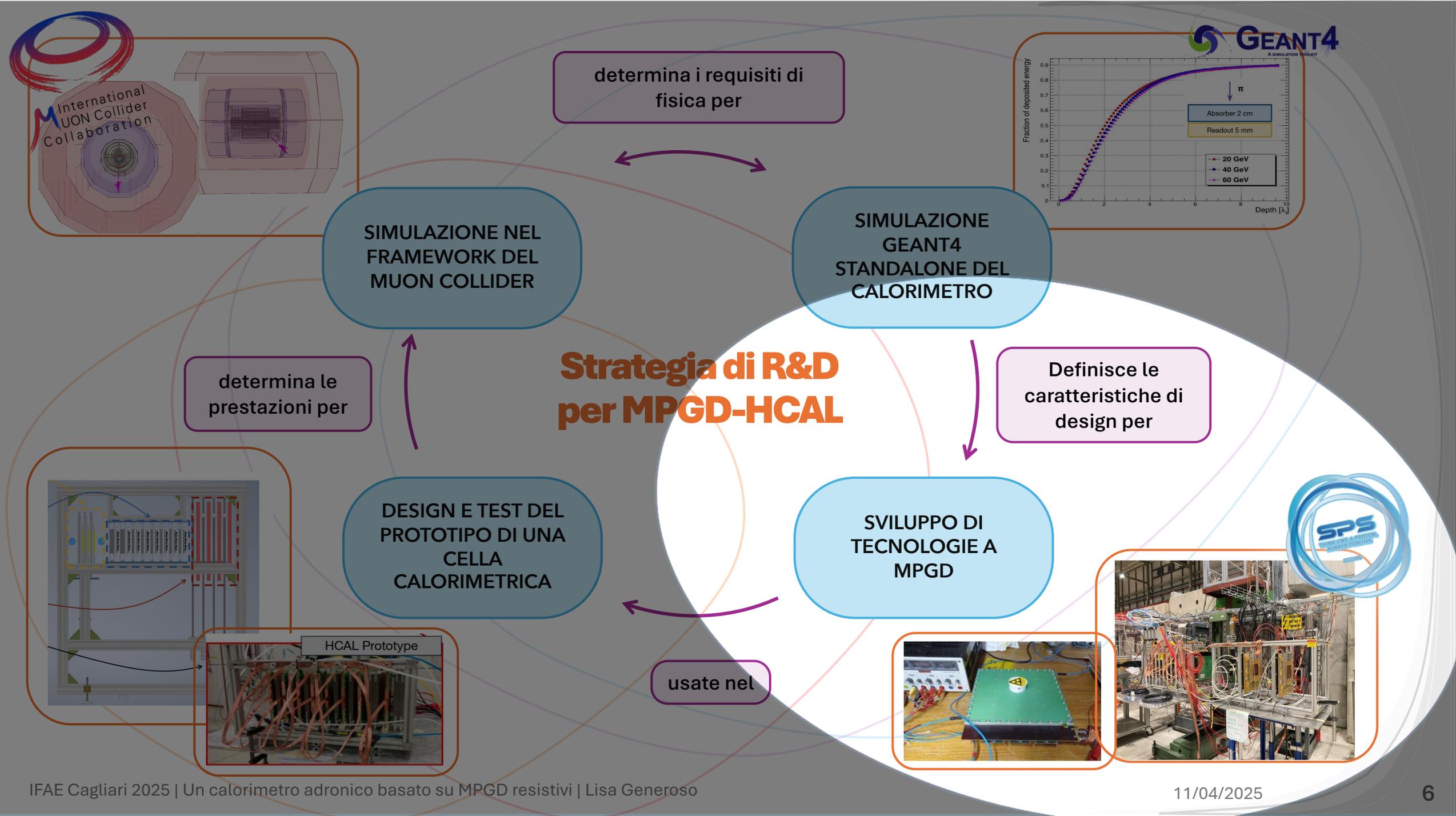


MIGLIORAMENTO
 --->
 DIGITIZZAZIONE
 A 3 SOGLIE

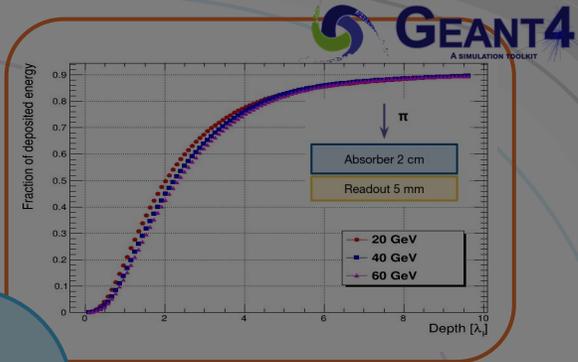


- La risoluzione energetica satura al ~20 % per energie > 40 GeV con il readout digitale
- Prestazioni migliori con il readout semidigitale

$$\sigma/E = 46\%/\sqrt{E} \oplus 12\%$$



determina i requisiti di fisica per



SIMULAZIONE GEANT4 STANDALONE DEL CALORIMETRO

Definisce le caratteristiche di design per

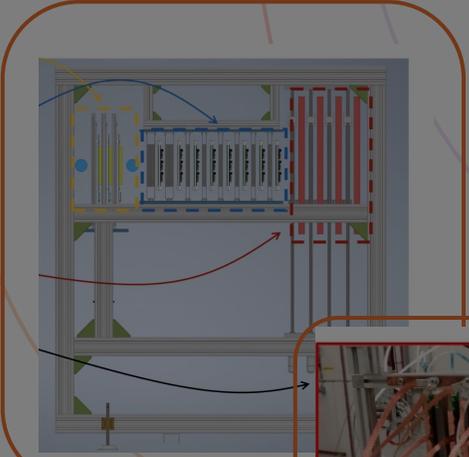
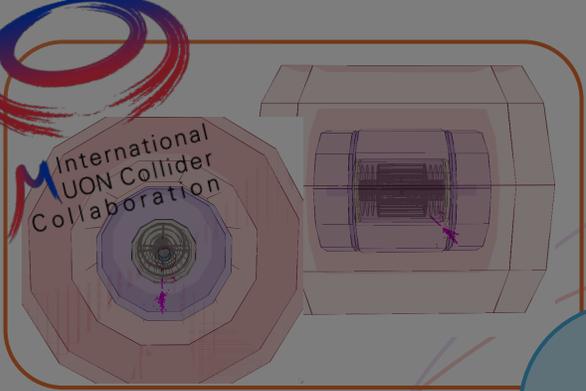
SVILUPPO DI TECNOLOGIE A MPGD

usate nel

DESIGN E TEST DEL PROTOTIPO DI UNA CELLA CALORIMETRICA

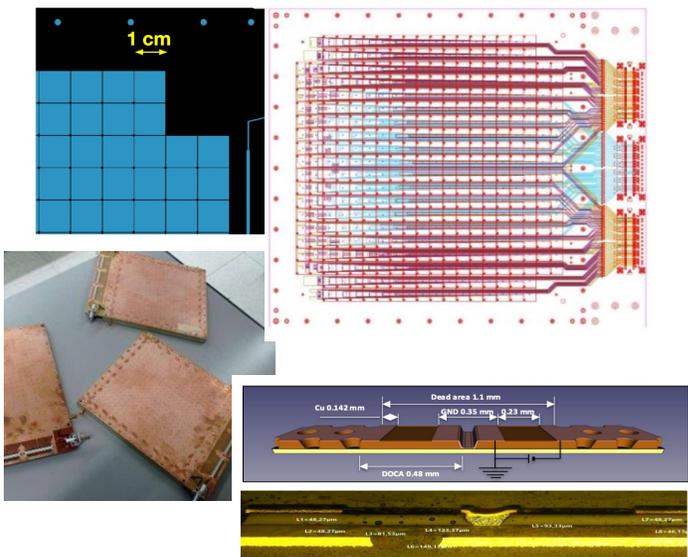
determina le prestazioni per

SIMULAZIONE NEL FRAMEWORK DEL MUON COLLIDER



TEST BEAM ALL'SPS

Caratterizzazione dei prototipi di MPGD con le MIP

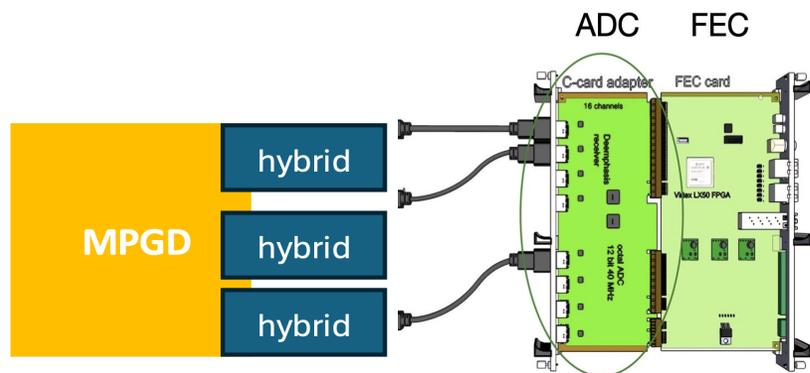


Tecnologie MPGD testate:

7 μ RWELL , 4 MicroMegas (MM) resistive , 1 RPWELL

Layout :

- area di 20x20 cm²
 - 384 pad da 1x1cm²
 - readout board comune
 - drift gap di 6 mm
 - μ RWELL: linee di grounding (PEP lines)
- accettazione geometrica di ~90%

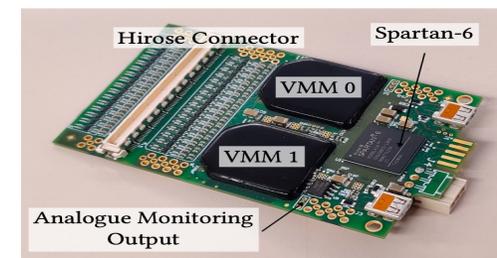
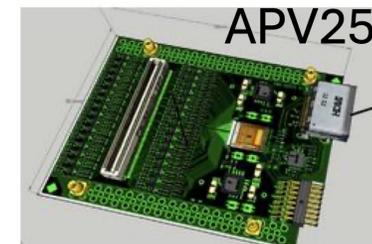


Set-up all'SPS (North area)

- Fasci di muoni di ~ 100 GeV
- Sistemi di trigger e tracciatori esterni

Miscele di gas :

- Ar/CO₂/CF₄ : 45/5/40 % & Ar/CO₂ : 70/30 % (μ RWELL)
- Ar/CO₂/iC₄H₁₀ 93/5/2% (MicroMegas, RPWELL)

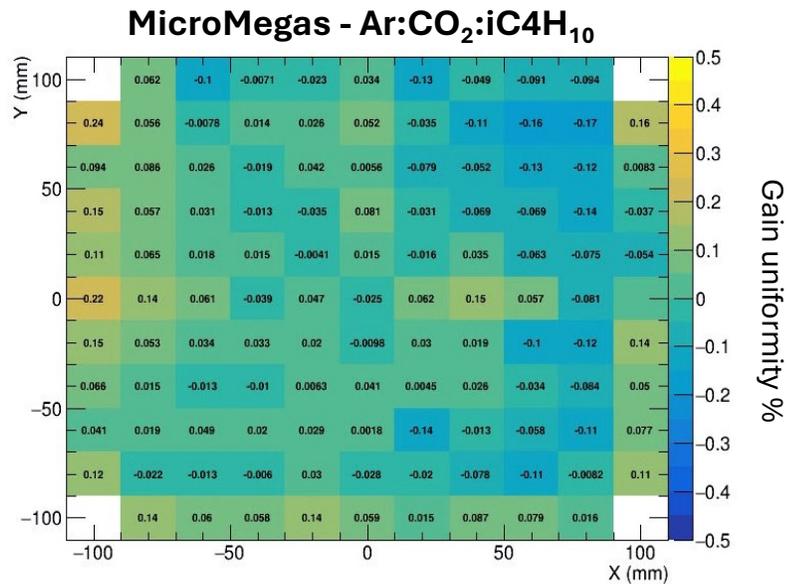


Ibridi integrati con il back-end SRS:

- APV25 (TB Settembre 2023, Luglio 2024)
- VMM3a (TB Settembre 2024)
- Rate di O(MHz/cm²) superiori agli APV (Una notte di acquisizione dati con le APV ~ due spill con le VMM)
- Possibilità di raggiungere soglie analogiche (THL) fino a 0.8 fC

TEST BEAM ALL'SPS

Caratterizzazione dei prototipi di MPGD con le MIP



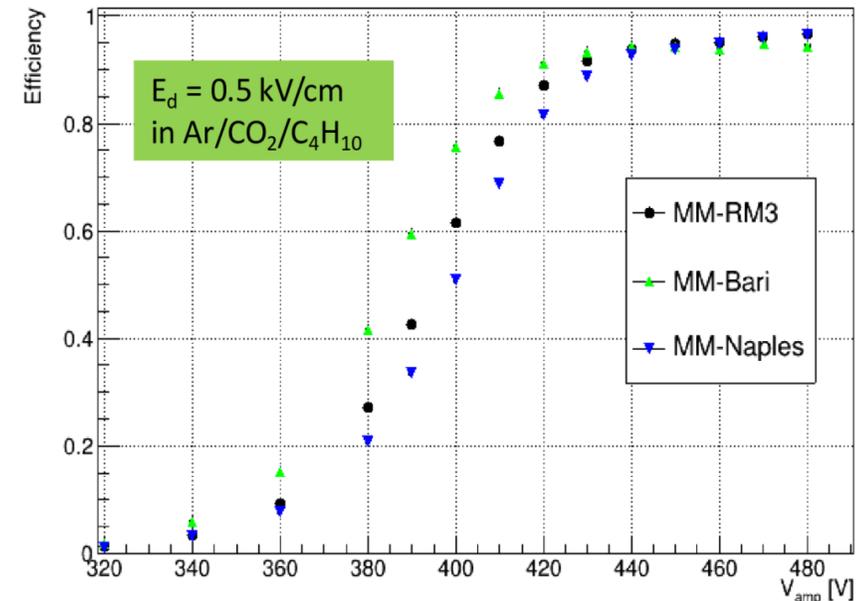
- Alta probabilità di **cross-talk** per accoppiamenti capacitivi dovuti a linee di segnale troppo vicine tra loro e alle pad
 - **Nuovo design:** distanza tra pad e primo layer di linee di segnale aumentata a 0.7 mm

Uniformità di guadagno

- **10% MicroMegas**, 16% μ RWELL (pattern sotto analisi), 22% RPWELL

Efficienza di rivelazione Vs Tensione di amplificazione (V_{amp}):

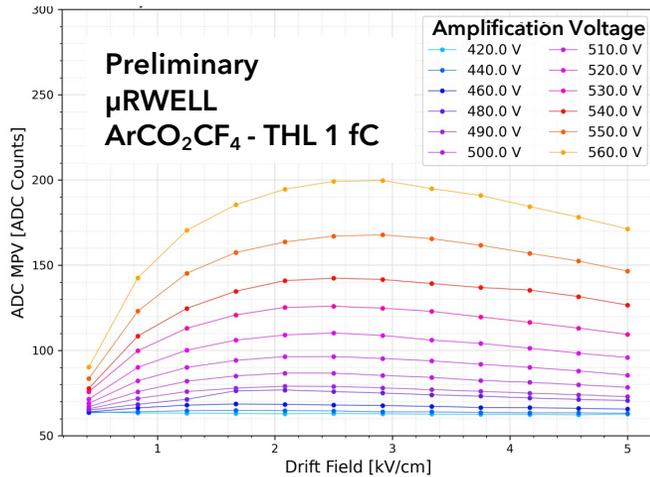
- Plateau al **95% per MicroMegas**, 90% RPWELL, $\lesssim 90\%$ per μ RWELL (per accettazione geometrica \rightarrow più dettagli in seguito)



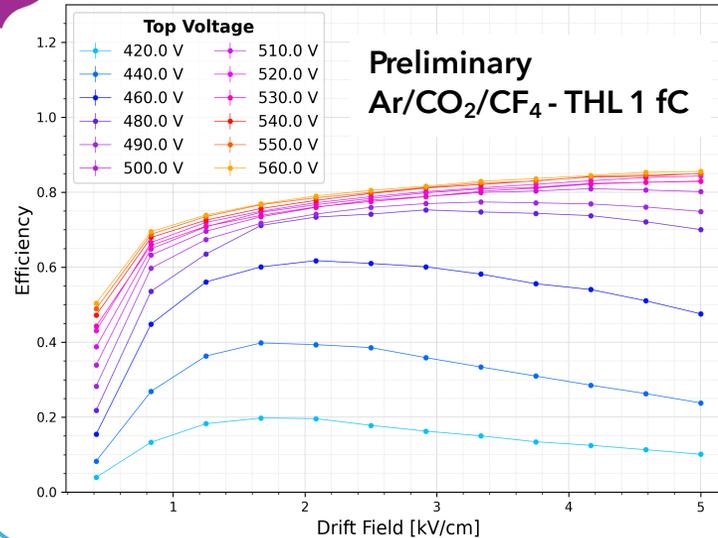
TEST BEAM ALL'SPS

Caratterizzazione delle μ RWELL con le MIP

- Il valore più probabile della carica (**MPV**) ha un **massimo a campi di drift (DF) ~2.5-3 kV/cm** per ogni V_{amp}
- Guadagno più basso ad alto drift per backflow/dispersione delle cariche

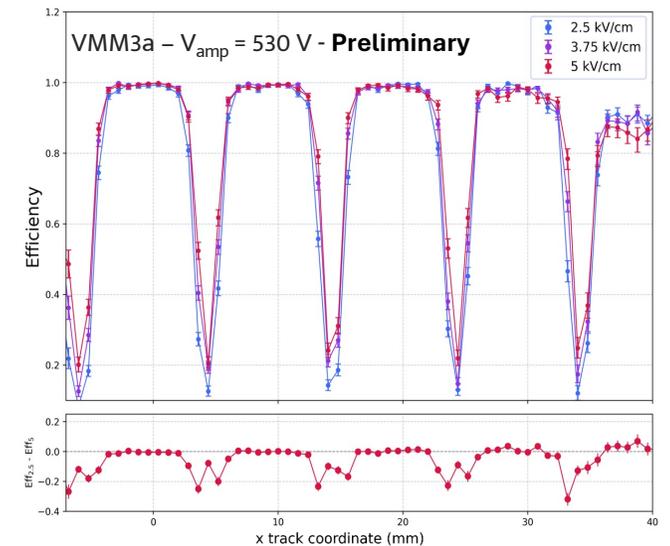


- Per $V_{amp} > 520$ V, l'efficienza aumenta con il DF nonostante una diminuzione del guadagno



Fenomeno di compensazione in corrispondenza delle zone morte?

Perdita di efficienza in corrispondenza delle PEP lines



Osservazione :

- All'aumentare del DF, le cadute di efficienza diventano più strette e meno pronunciate



Interpretazione :

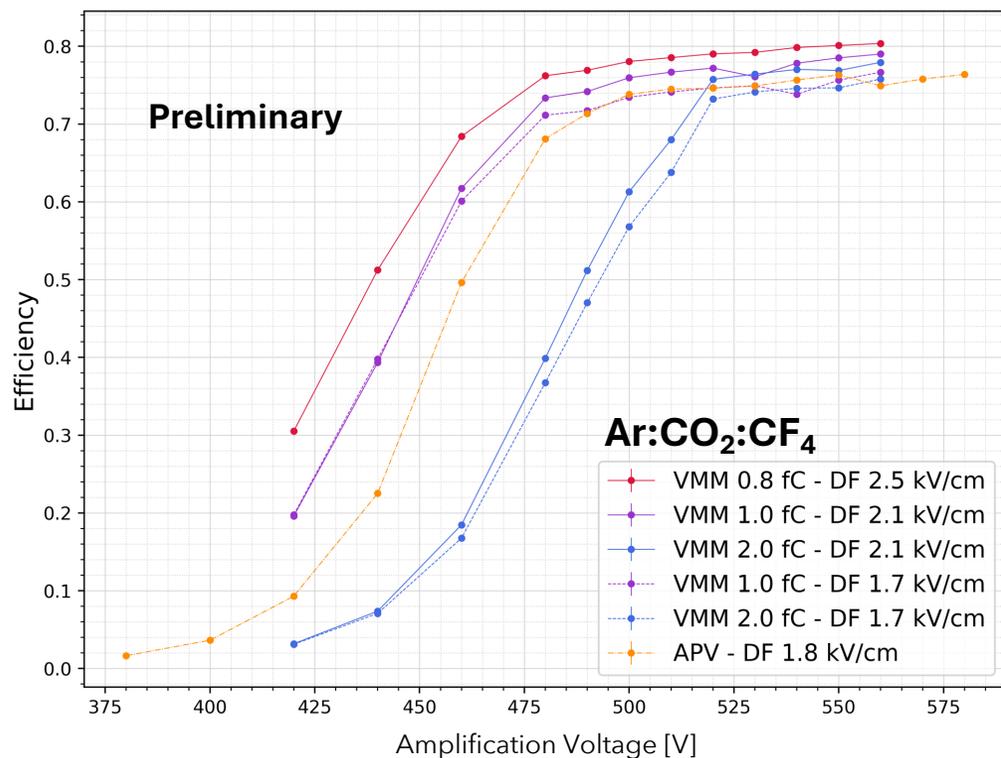
- Per $V_{amp} < 520$ V, l'efficienza del detector è limitata da bassa efficienza di raccolta di primari nelle zone di amplificazione
- Per $V_{amp} > 520$ V, elevati DF favoriscono la raccolta di cariche generate vicino alle PEP lines, compensando la diminuzione in guadagno e migliorando l'efficienza

TEST BEAM ALL'SPS

Efficienza delle μ RWELL con le MIP

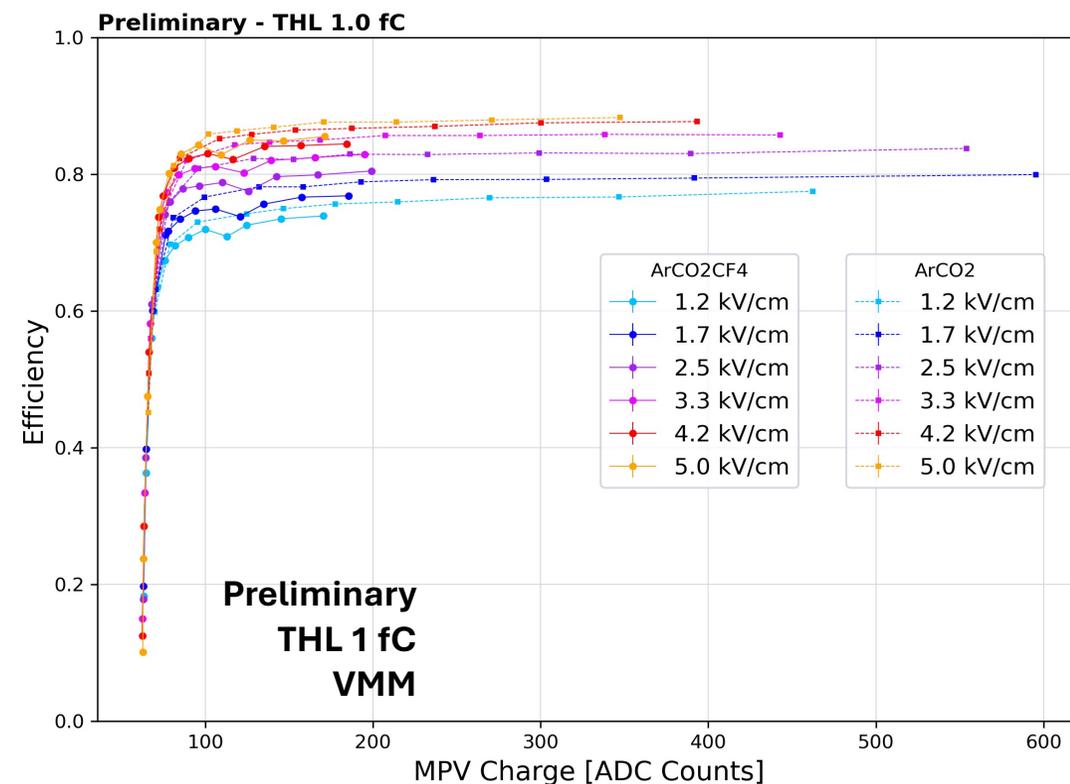
ASIC: VMM Vs APV

- APV con DF a 1.8 kV/cm (TB 07-2024)
- Fronte di salita e plateau di efficienza con le APV compatibile con le VMM per THL 1 fC a DF = 1.7 kV/cm



Gas: ArCO₂CF₄ Vs ArCO₂

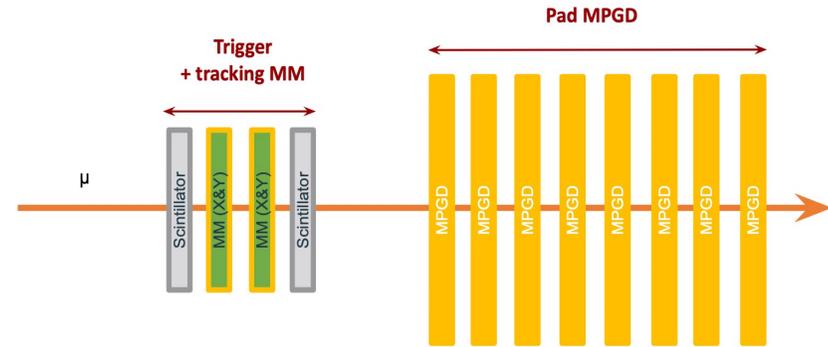
- Maggiore guadagno con Ar/CO₂ 70/30
- Plateau di efficienza di qualche % più alto in Ar/CO₂ rispetto a Ar/CO₂/CF₄



TEST BEAM ALL'SPS

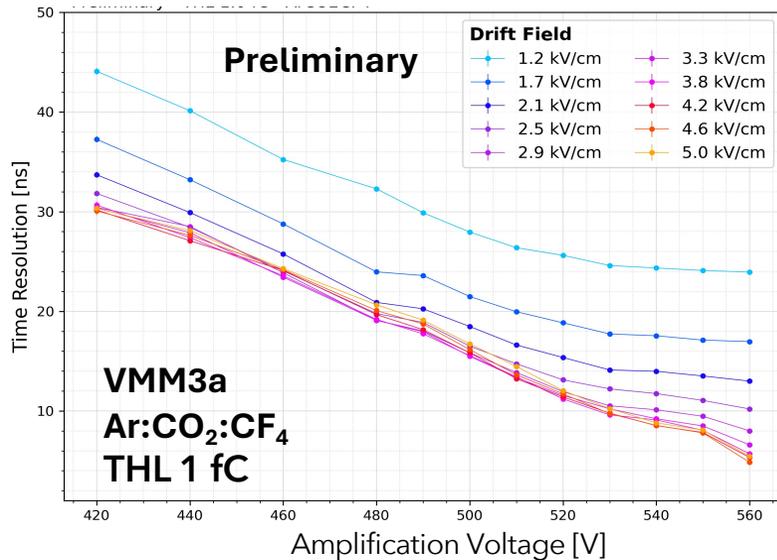
Risoluzione temporale delle μ RWELL

- Timing della traccia ricostruita come riferimento temporale
- Fit gaussiano di $\Delta t = t_{\text{track}} - t_{\text{cluster}} \rightarrow \sigma_{\text{meas}} = \sigma_{\text{cluster}} \oplus \sigma_{\text{track}}$
 \rightarrow Risoluzione temporale corretta : $\sigma_{\text{cluster}} = \sqrt{\sigma_{\text{meas}}^2 - \sigma_{\text{track}}^2}$



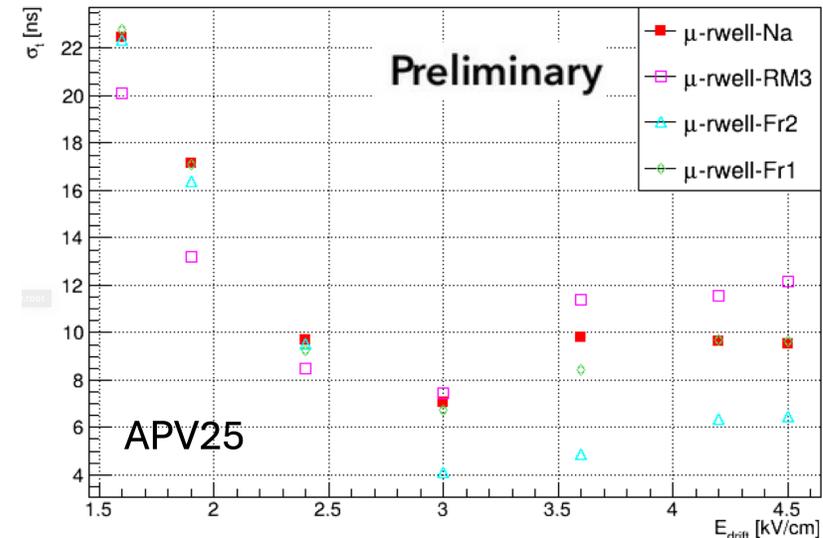
VMM3a

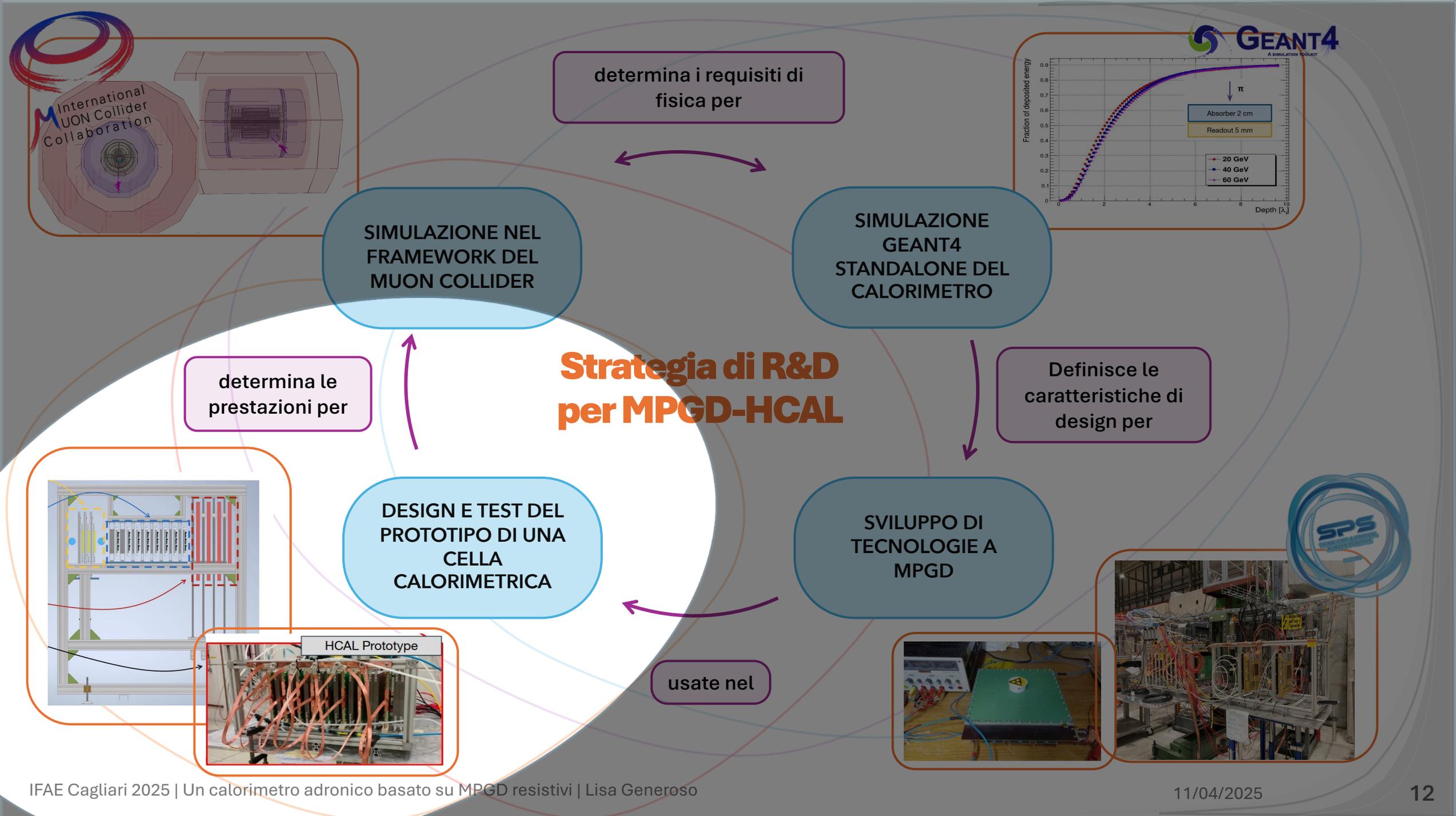
- t_{cluster} = tempo del picco del segnale
- Miglior risultato : ~ 6 ns in Ar:CO₂:CF₄ a $V_{\text{amp}} = 560$ V e DF ~ 4.5 kV/cm



APV25

- t_{cluster} ottenuto dal fit del fronte di salita del segnale + correzione per time-walk
- Migliori risultati : $\sim 4-7$ ns in Ar:CO₂:CF₄ a DF ~ 3 kV/cm e $V_{\text{amp}} \sim 520$ V





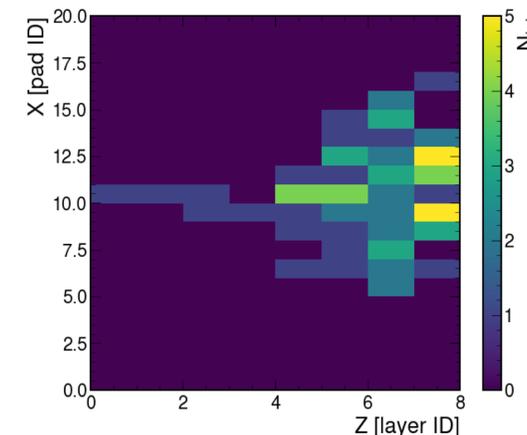
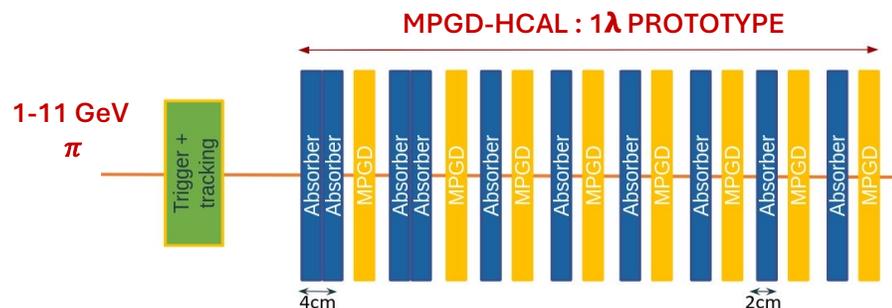
TEST BEAM AL PS

Studio di shower di pioni in un prototipo di HCAL

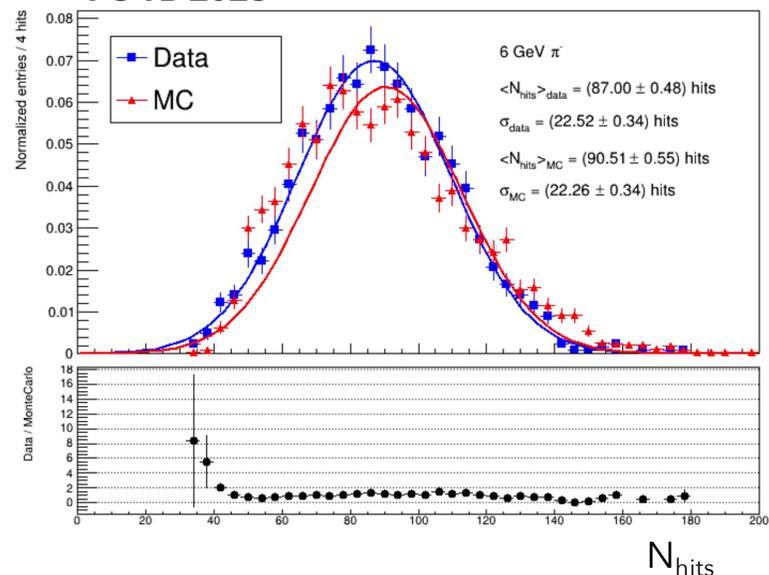
- Fasci di pioni carichi da 1 a 10 GeV al PS (East Area, CERN)

Obiettivo:

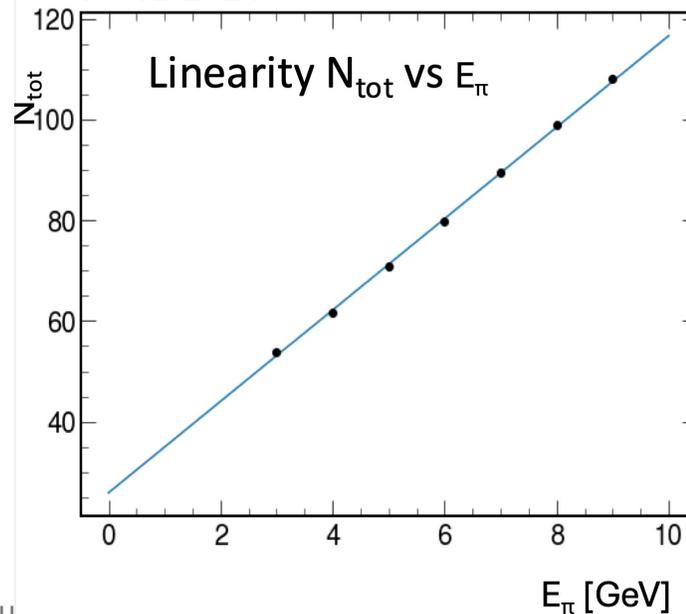
- Misura della risoluzione energetica di un prototipo di calorimetro con spessore pari a 1λ :
 - **8 strati di MPGD da $20\times 20\text{ cm}^2$ + 8 strati di assorbitori in acciaio**
- Confronto con simulazioni MC



PS TB 2023



PS TB 2024



Risultati preliminari per read-out digitale

- Buon accordo dati/MC nel numero di hit per shower
- Buona linearità del numero di hit con l'energia

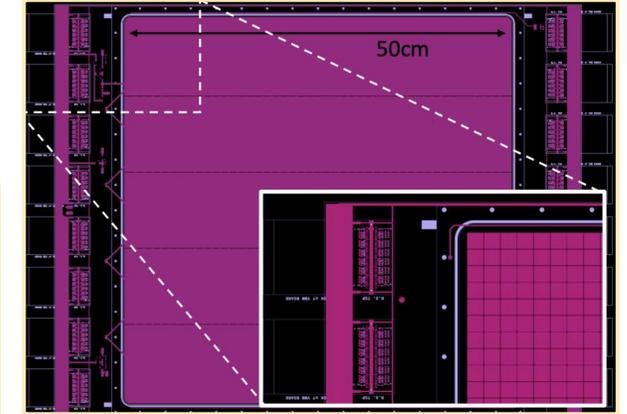
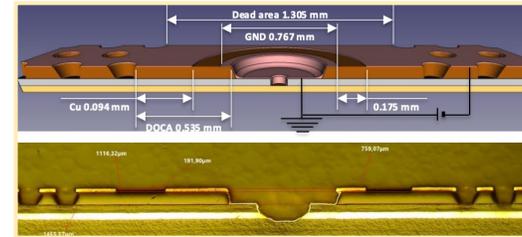
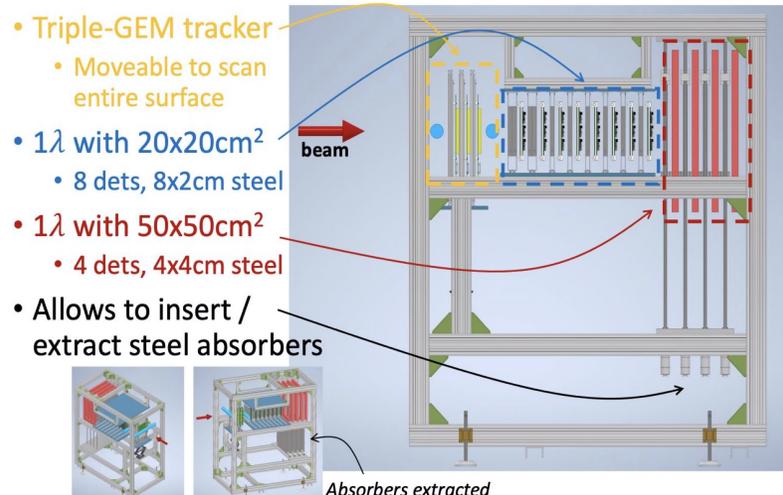
In corso:

- Ottimizzazione delle soglie per progettazione del read-out semidigitale

OBIETTIVI FUTURI

R&D di una nuova cella calorimetrica di 2λ

- 8 camere da $20 \times 20 \text{ cm}^2$ già testate
- + Produzione e test di **4 nuovi detector da $50 \times 50 \text{ cm}^2$** :
 - Pad da 121 mm^2 con 16 slot per le schede di read-out
 - Distanza tra linee di segnale e pad di read-out aumentata per eliminare il cross-talk
 - 2 MicroMegas
 - 2 μ -RWELL con l'implementazione del nuovo schema di grounding PEP-DOT DLC
 - Analisi di uniformità della risposta in guadagno



Integrazione con elettronica di lettura veloce e ad alto rate:

- Studi in corso con VMM3a
- Test con chip FATIC3 e CALOROC

Ulteriori studi:

- Risoluzione in energia utilizzando l'approccio semi-digitale
- Ottimizzazione dello spessore del drift gap per timing e guadagno
- Studio di miscele di gas alternative

Test Beam in programma:

- Nell'ambito del DRD6 nell'autunno 2025
- Common Project con l'ECAL CRILIN nel 2026

CONCLUSIONI

R&D di un calorimetro adronico basato su MPGD resistivi

Studi simulati:

- MPGD-HCAL isolato in GEANT4 → design layout per contenimento completo delle shower adroniche
- Framework Muon Collider → readout semidigitale con risoluzione energetica superiore al digitale

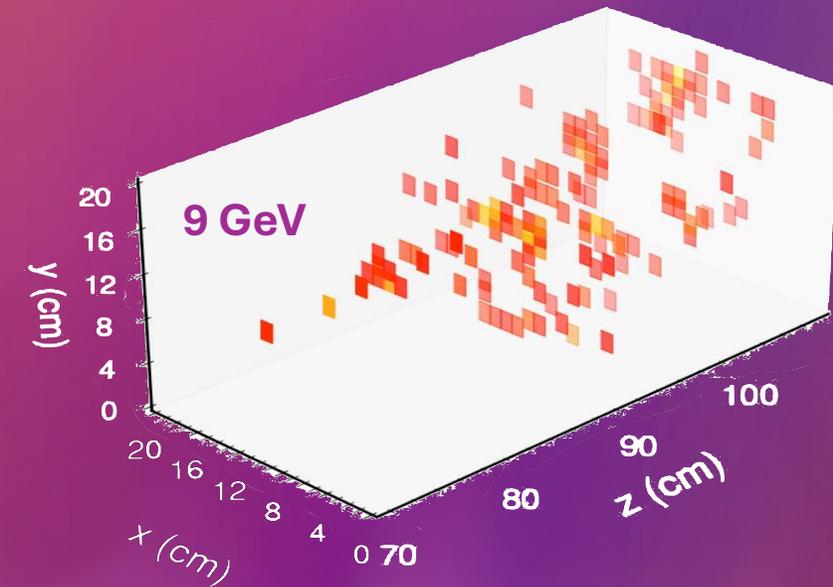
Campagne di test beam:

Caratterizzazione di 12 MPGD 20x20 cm² con MIP all'SPS:

- Micromegas: migliore uniformità di guadagno e plateau di efficienza più alto
- μ RWELL: miglior risoluzione temporale con l'uso di CF₄ → ancora da valutare le performance delle MicroMegas con una miscela di gas "veloce"
- Integrazione chip VMM3a per elettronica ad alto rate, confronto e compatibilità con APV25
- Analisi delle shower di pioni in prototipo di cella calorimetrica 1 λ al PS → buon accordo dati/MC e linearità nel numero di hit per readout digitale

Sviluppi futuri:

- Produzione e test di camere più grandi (50 × 50 cm², 100 × 50 cm²)
- Estensione della cella calorimetrica a 2 λ con ricostruzione energetica semidigitale
- Scelta della migliore tecnologia, layout, miscela di (eco) gas ed elettronica di read-out



GRAZIE
PER L'ATTENZIONE

SLIDE
DI BACKUP

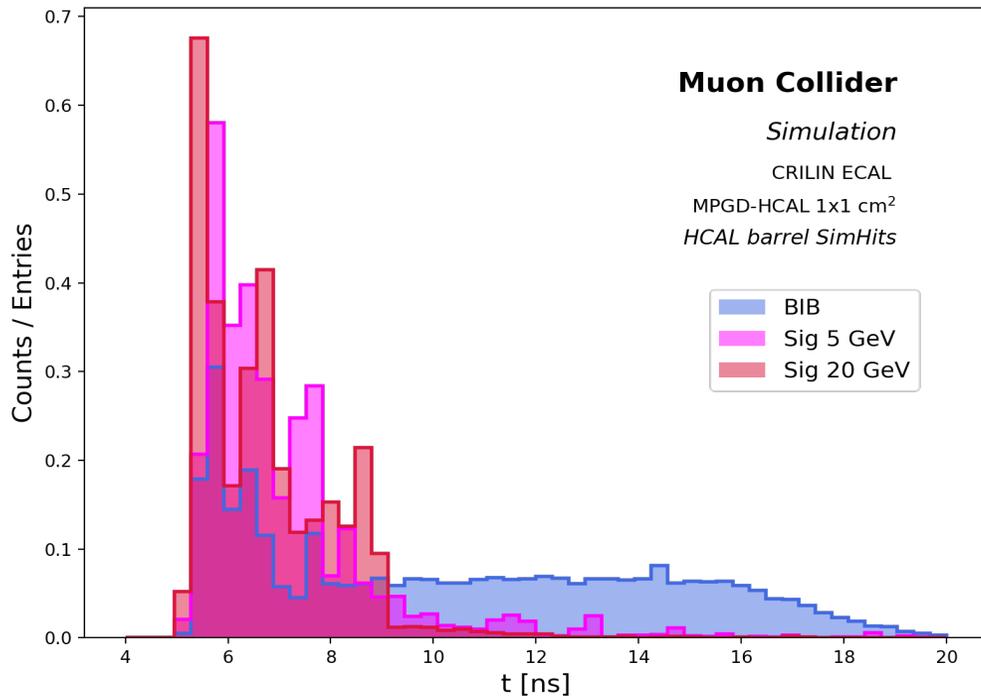
SIMULAZIONI

Gun di pioni + fondo nel framework del Muon Collider

Simulazione del Beam Induced Background (BIB) (ad un'energia del centro di massa di 1.5 TeV)

- Contenimento del BIB nei primi 20 strati
- Distribuzione uniforme del tempo di arrivo nel range 7-20 ns

ARRIVAL TIME

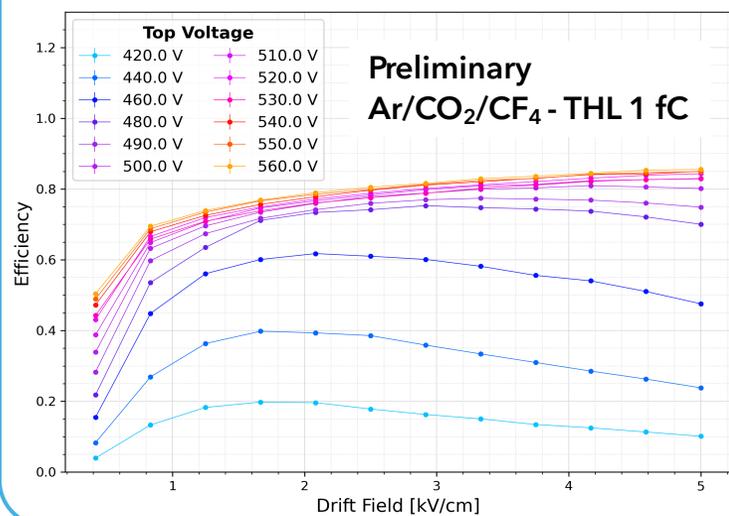


- Il tempo di arrivo del segnale picca a ~ 6ns;
- Reieizione del fondo a $t > 9/10$ ns
→ possibile con un calorimetro a MPGD

TEST BEAM ALL'SPS 2023 & 2024

Efficienza delle μ RWELL con le MIP

Per $V_{amp} > 520$ V l'efficienza aumenta con il DF nonostante una diminuzione del guadagno

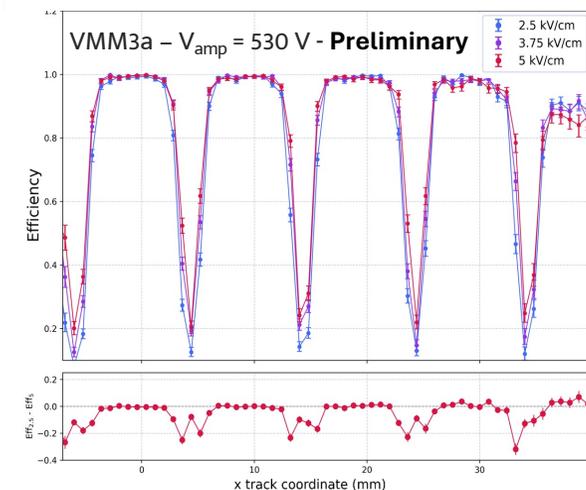
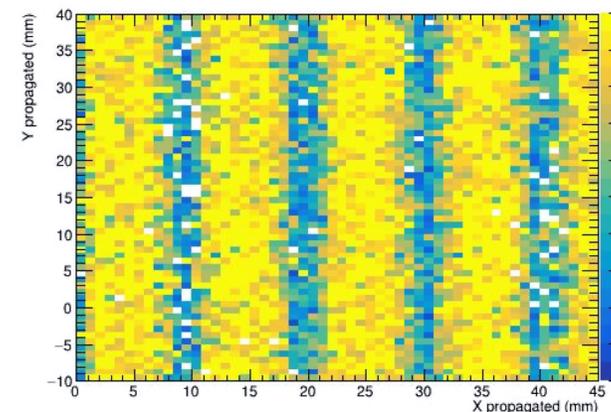
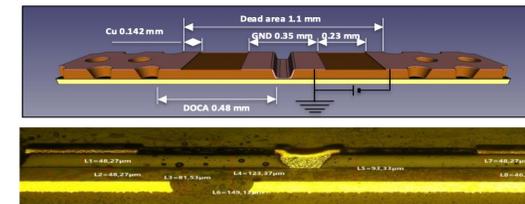
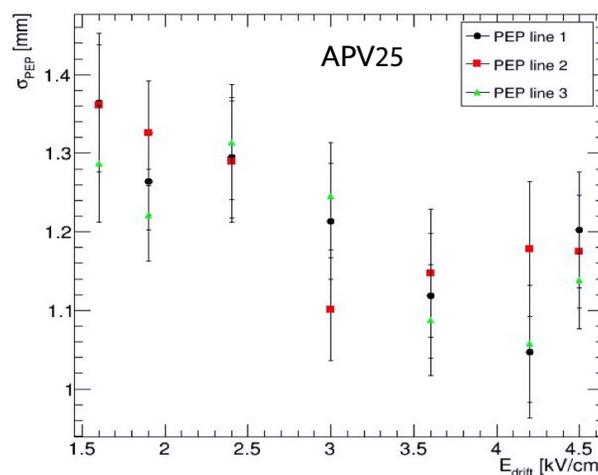


Fenomeno di compensazione in corrispondenza delle zone morte ?

Perdita di efficienza in corrispondenza delle linee di grounding (PEP lines) con zone morte di circa 1 mm

Osservazione :

- All'aumentare del DF, le cadute di efficienza diventano più strette e meno pronunciate



Interpretazione :

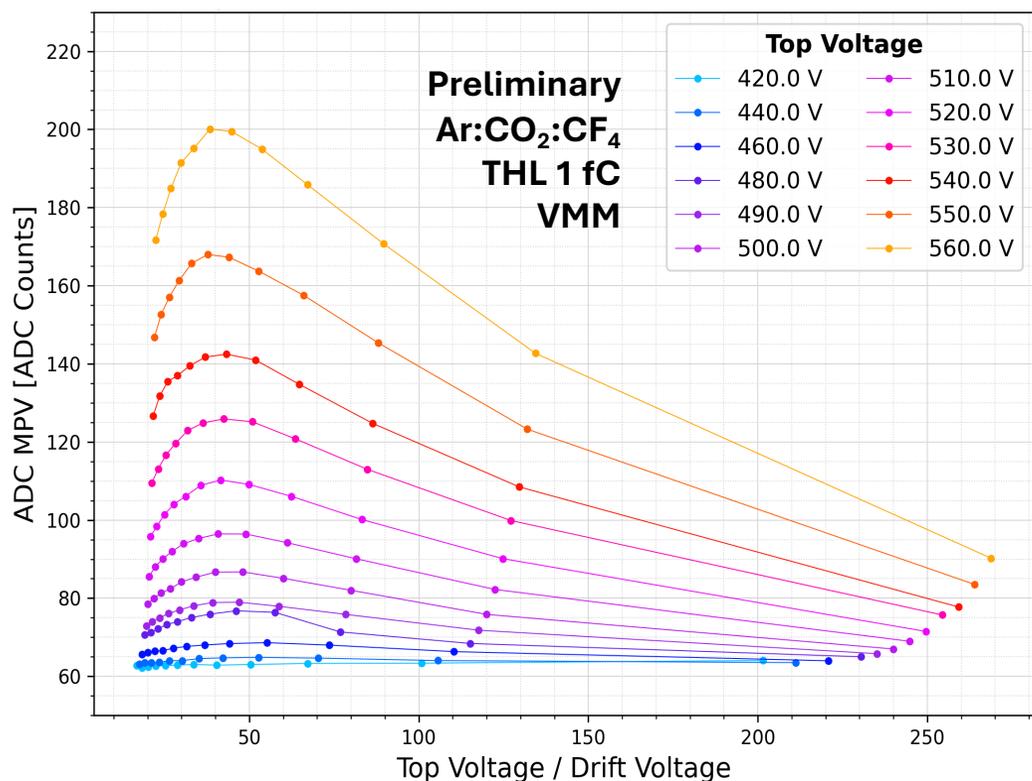
- Per $V_{amp} > 520$ V, campi di drift elevati favoriscono la raccolta di cariche generate vicino alle line PEP, migliorando l'efficienza
- Altrimenti, l'efficienza del detector è limitata da una più bassa efficienza di raccolta di primari nella zone di amplificazione

TEST BEAM ALL'SPS

Caratterizzazione delle μ RWELL con le MIP

Carica vs Rapporto tra Campi

- La carica cresce con la tensione di amplificazione
Carica massima ad un rapporto di ~ 40



Efficienza vs carica / THL: 1 fC Vs 2 fC

- Più bassa è la THL, più alto e più anticipato è il plateau

