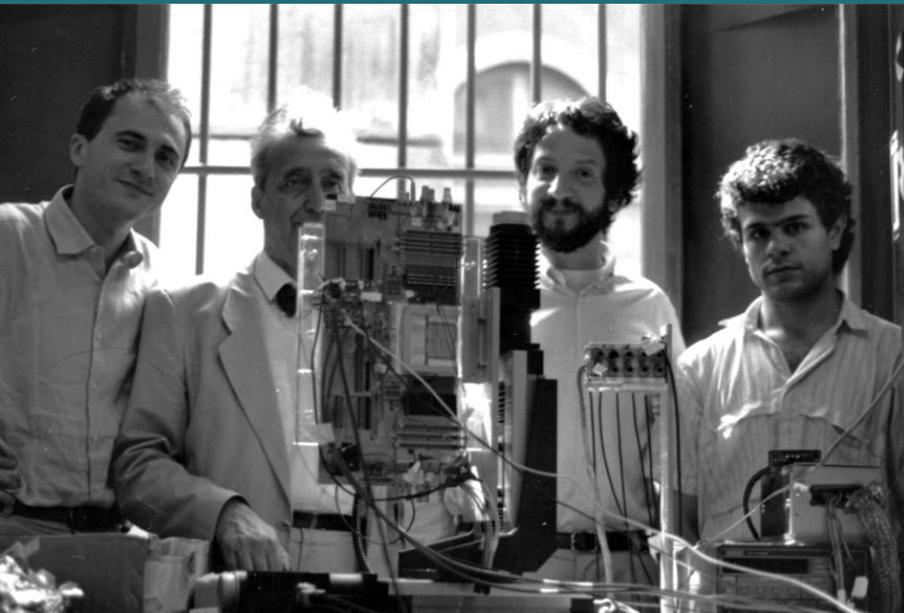


Le camere a deriva di silicio per la missione eXTP

Gianluigi Zampa, INFN Trieste

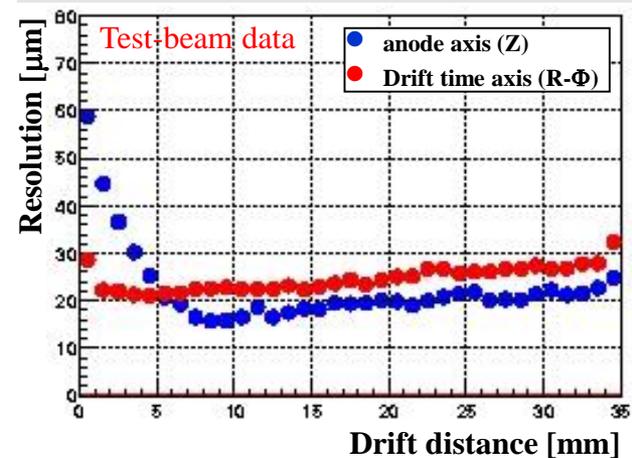
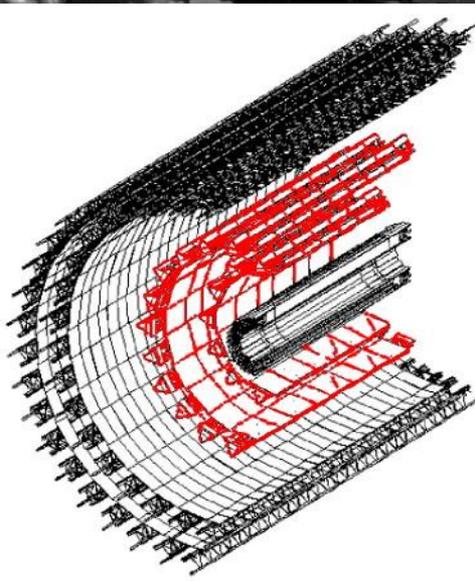
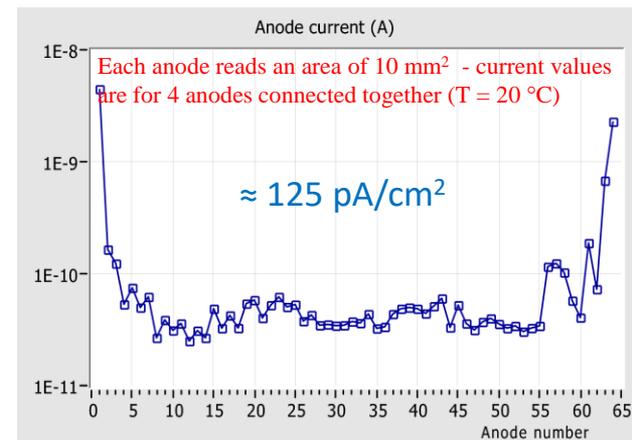
Meeting eXTP – Roma, Presidenza INFN – 11
Dicembre 2019

Una storia lunga quasi tre decenni



Sviluppo iniziato subito dopo l'invenzione delle SDD e culminato nel 2002 con la produzione delle prime SDD dell'esperimento ALICE ad LHC in collaborazione con **CANBERRA**, poi:

- **600 rivelatori** prodotti e testati, **260 rivelatori** montati
- Resa di produzione migliore di 60% (**> 90%** per gli ultimi lotti)



Caratteristiche delle SDD di ALICE



Wafer type:

- 5" Neutron Transmutation Doped <111> 3 k Ω -cm, thickness 300 μ m

Area:

- Sensitive: $7.02 \times 7.53 \approx 53 \text{ cm}^2$, divided in 2 drift regions
- total: $7.25 \times 8.76 \text{ cm}^2$, (ratio = 0.83)

Each drift region:

- has a length of 35 mm
- has 291 cathodes biased by an integrated voltage divider
- has 256 anodes – pitch of 294 μ m
- has 3 lines of 33 MOS charge injectors for the drift velocity calibration

Guard region:

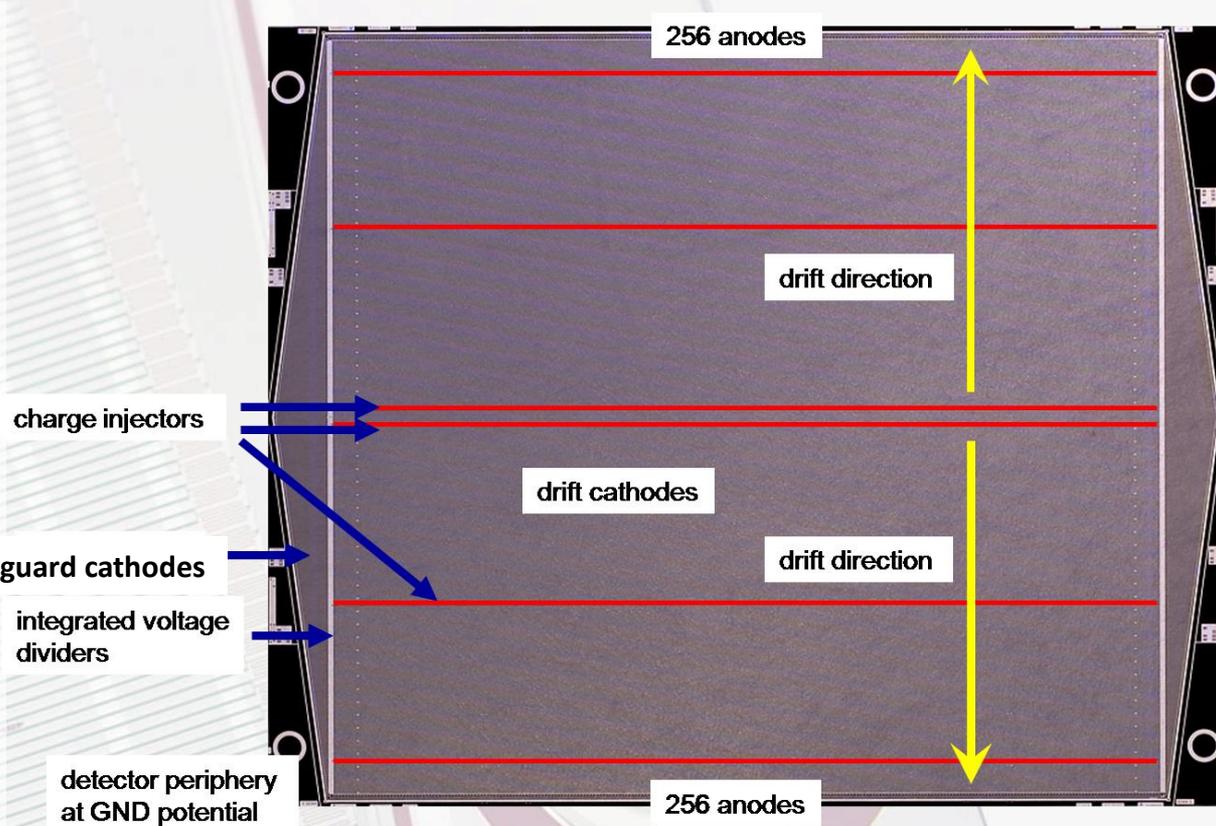
- independent voltage dividers

Integrated dividers:

- Equivalent resistance of all voltage dividers $R_{\text{tot}} = 4781 \text{ k}\Omega$

Each anode:

- has a very small capacitance of $\sim 100 \text{ fF}$
- reads an area of 10 mm^2



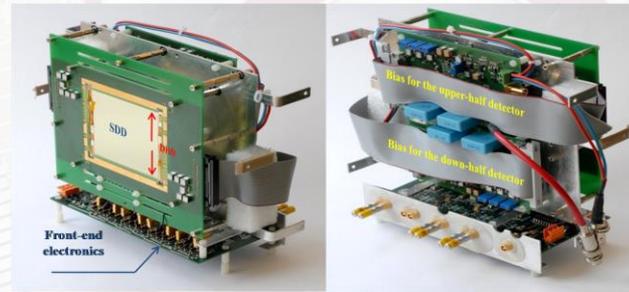
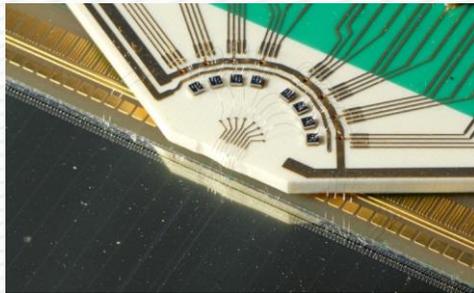
Maximum ratings for the detector bias:

- HV bias: -2.4 kV, 8V/cathode $E = 670 \text{ V/cm}$
- for a maximum drift time of 4.3 μ s, $v_d = 8 \mu\text{m/ns}$
- total current on the voltage dividers $\sim 0.48 \text{ mA}$
- on board power consumption: 1.15 W

La sfida dei raggi X

Le SDD lineari non sono adatte a gestire gli alti flussi di eventi dei nuovi esperimenti agli acceleratori, però hanno dei vantaggi che le rendono interessanti per la spettroscopia X:

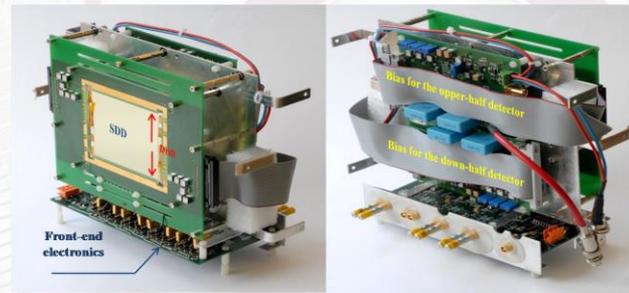
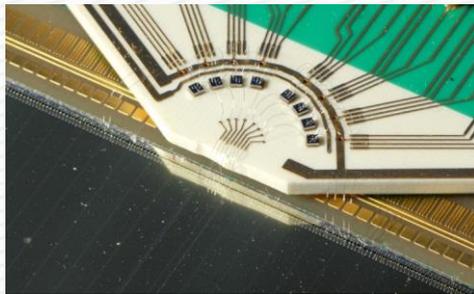
- La bassa capacità degli anodi permette di lavorare vicino al limite di Fano
- La disposizione in linea degli anodi e la grande area sensibile permettono di coprire superfici molto grandi (tiling) mantenendo un ottimo rapporto area sensibile/totale
- Se sviluppate nel modo corretto hanno potenziale impiego in molti campi, sia scientifici che industriali



La sfida dei raggi X

Le SDD lineari non sono adatte a gestire gli alti flussi di eventi dei nuovi esperimenti agli acceleratori, però hanno dei vantaggi che le rendono interessanti per la spettroscopia X:

- La bassa capacità degli anodi permette di lavorare vicino al limite di Fano
- La disposizione in linea degli anodi e la grande area sensibile permettono di coprire superfici molto grandi (tiling) mantenendo un ottimo rapporto area sensibile/totale
- Se sviluppate nel modo corretto hanno potenziale impiego in molti campi, sia scientifici che industriali



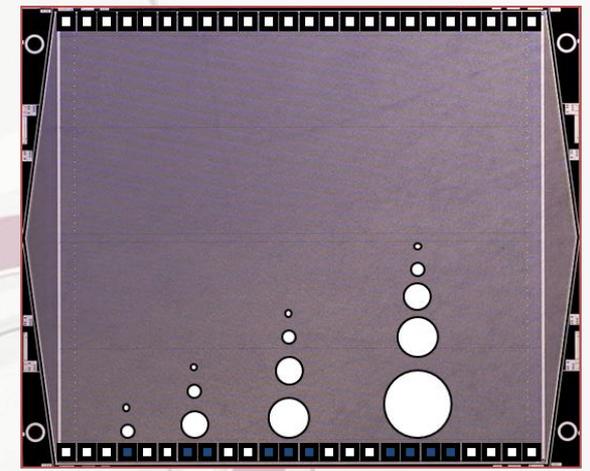
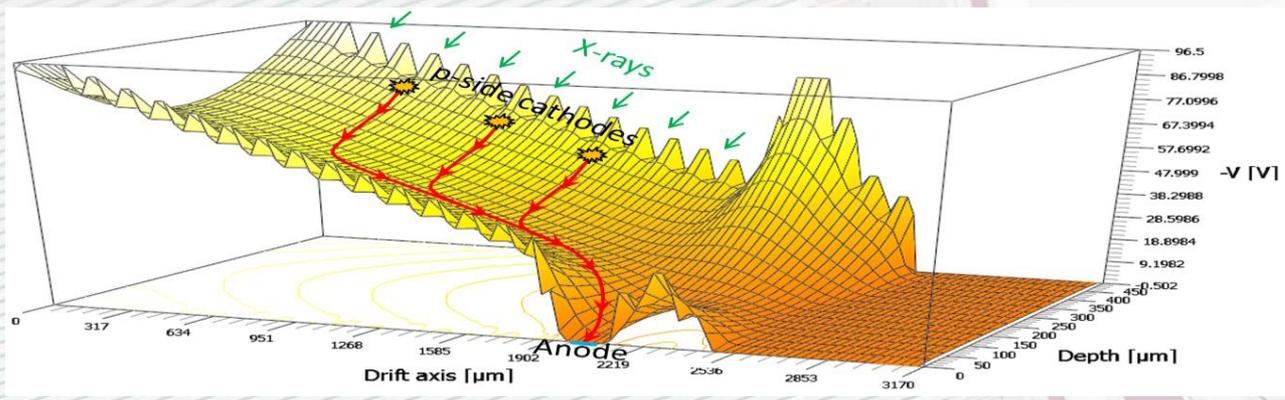
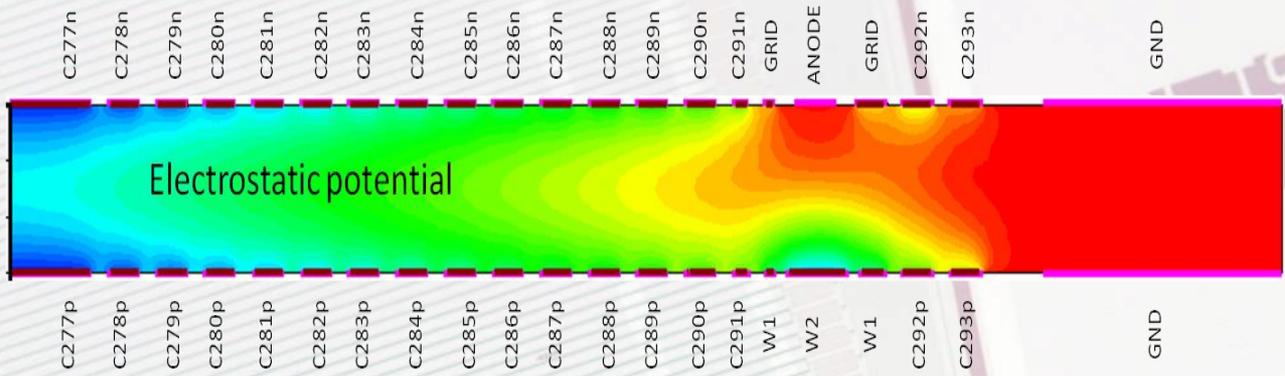
→ Proposta in CSN5 per lo sviluppo di camere a deriva di grande area (non necessariamente lineari) e di elettronica integrata dedicata per applicazioni di spettroscopia X (e γ) **con un partner tecnologico italiano: FBK**

Gli altri ingredienti

- Un utilizzatore potenziale che potesse fornire specifiche e collaborasse al test funzionale delle SDD → [INAF/IAPS Roma](#), [INAF/IASF Bologna](#)
- Dei partner con esperienza di progetto di elettronica di front-end ASIC a bassissimo rumore → [PolIMI \(Prof. G. Bertuccio\)](#) e [UniPV \(Prof. P. Malcovati\)](#)
- Sinergia con gli altri ambiti di sviluppo del progetto per l'acquisizione e la condivisione di esperienze e fondi esterni (EuroFEL, ASI)



La camera a deriva lineare – Implicazioni sulla performance

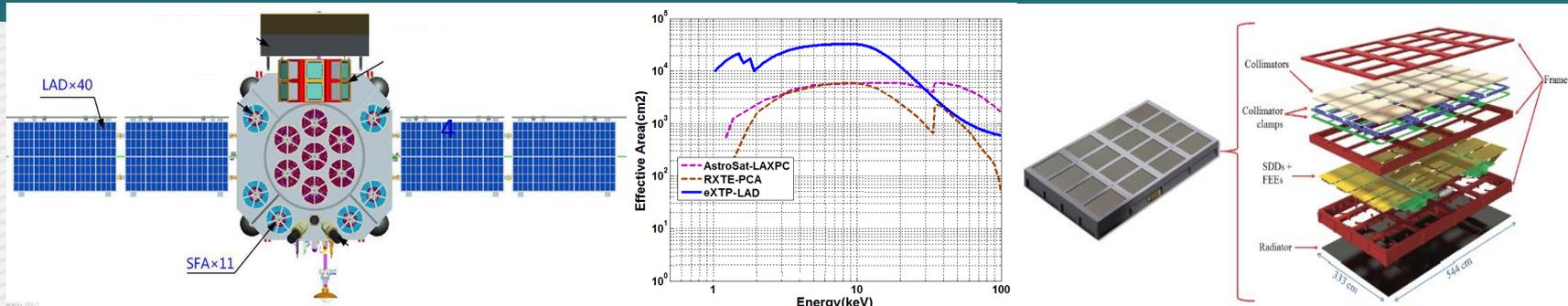


$$v = \mu \cdot E \quad \sigma = \sqrt{2Dt + \sigma_0} = \sqrt{2 \frac{k_B T}{q} \mu \cdot \frac{x}{\mu E} + \sigma_0} = \sqrt{2 \frac{k_B T}{qE} x + \sigma_0}$$

→ Diversi anodi (N) sono coinvolti nell'acquisizione di ogni evento: **il rumore elettronico contribuisce alla risoluzione energetica con un fattore \sqrt{N}**

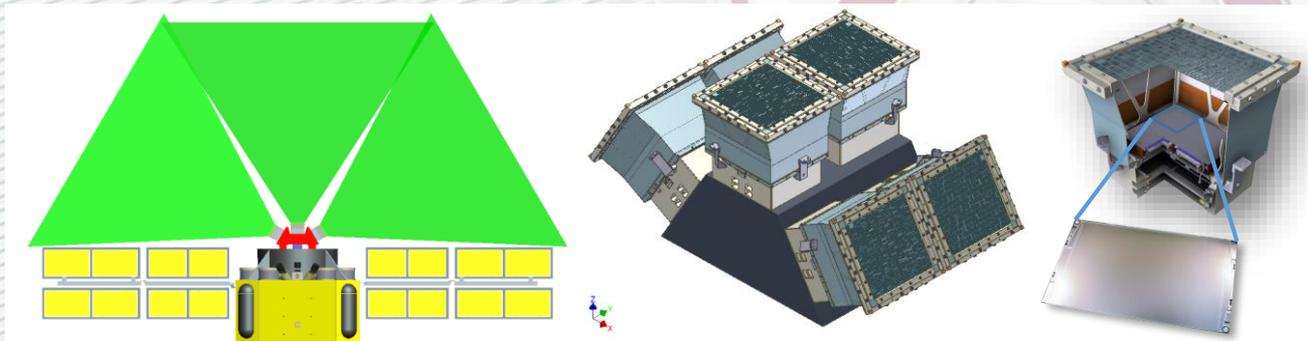
- La migliore risoluzione energetica si ottiene quando non più di 2 anodi hanno segnale
- Un passo anodico molto piccolo permette di stimare la distanza dagli anodi del punto di interazione

L'applicazione: eXTP (LOFT)



Large area Detector (40 moduli da 16 SDD): spettroscopia con collimatore basato su microchannel plate

- ❖ Area effettiva totale: **3.4 m² @8 keV**
- ❖ Banda di energia: 2-30 keV
- ❖ Risoluzione energetica: **<240 eV FWHM @6 keV**
- ❖ Single photon, <10 μ s



Wide Field Monitor (tre unità, sei camere): imaging (**risoluzione <5 arcmin, 1 arcmin PSLA**) con grande campo di vista (**4 steradiani al 20%**)

- ❖ Banda di energia: 2-50 keV
- ❖ Risoluzione energetica: **300 eV FWHM @6 keV**
- ❖ Area effettiva: 80 cm² @6 keV (1 unit, on axis)

Ottimizzazione delle SDD

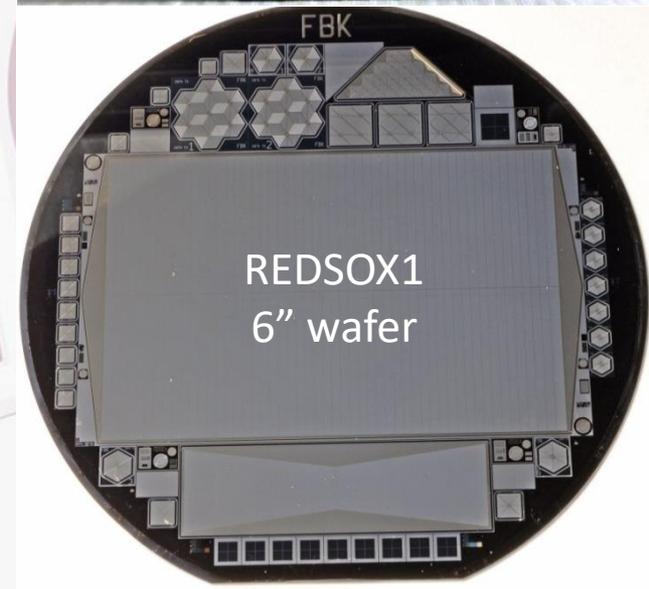
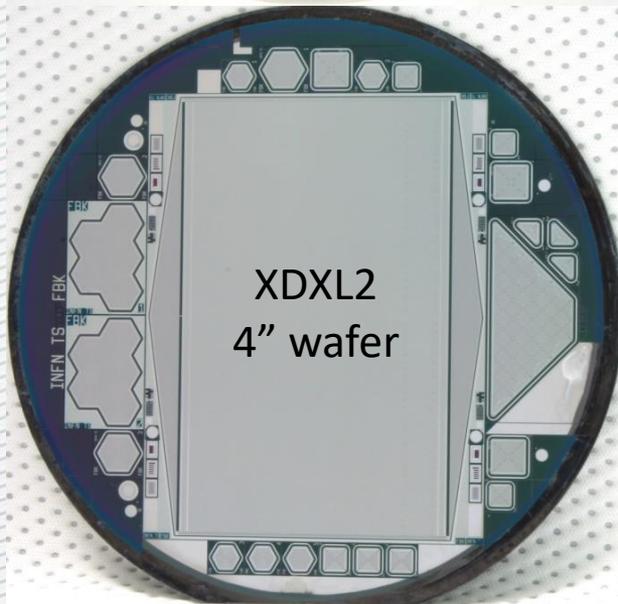
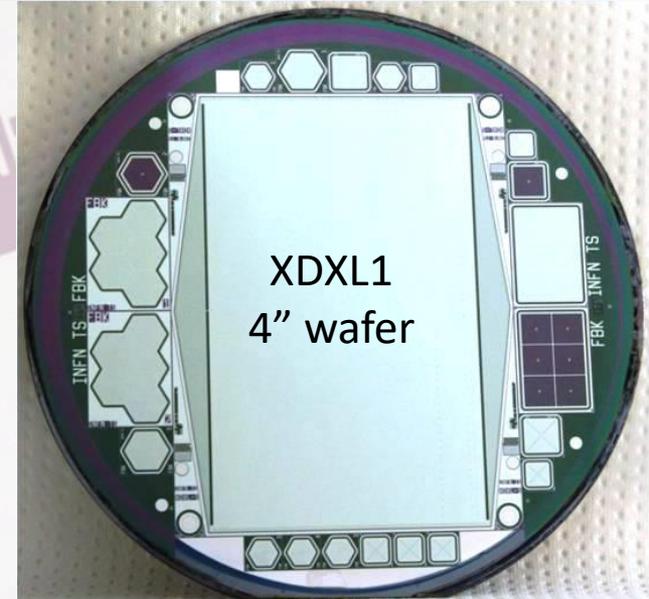
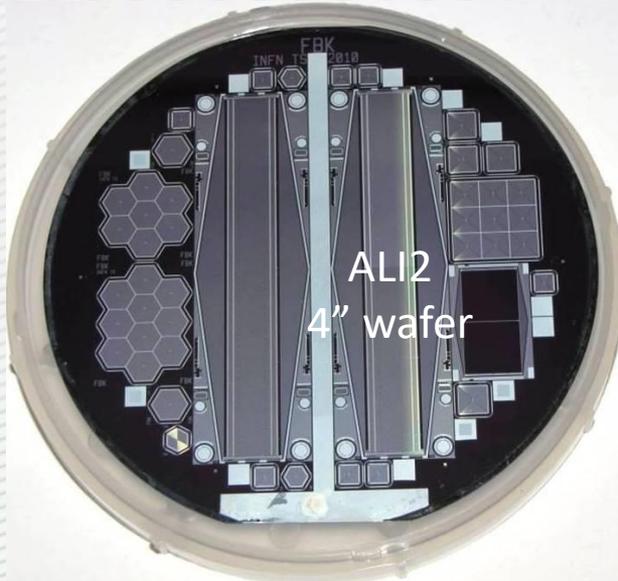
- Consumo di potenza: $< 0.5 \text{ mW/cm}^2$ (30 volte inferiore ad ALICE)
- Maggiore area efficace in entrambi gli estremi della banda di energia: rivelatori più spessi, minori aree morte
- Passo anodico ottimizzato per spettroscopia (LAD) o imaging (WFM) tenendo conto dei limiti di potenza imposti al front-end (0.5 mW/canale per il LAD, poco più per il WFM) e della risoluzione energetica specificata
- Robustezza rispetto all'ambiente operativo, sia a terra che in orbita: aggiustamenti al layout e test di qualifica
- Corrente di leakage a inizio missione: $\leq 150 \text{ pA/cm}^2$

Ottimizzazione delle SDD

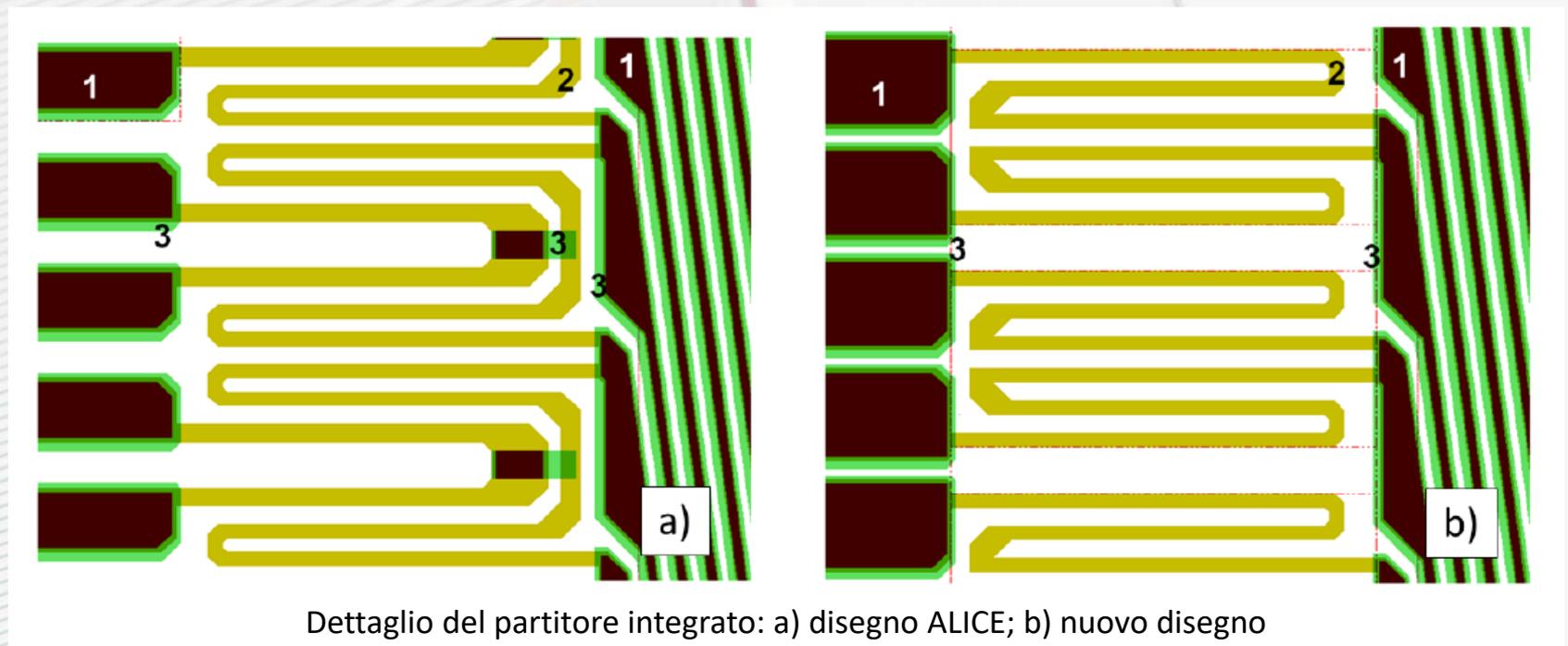
- Consumo di potenza: $< 0.5 \text{ mW/cm}^2$ (30 volte inferiore ad ALICE)
- Maggiore area efficace in entrambi gli estremi della banda di energia: rivelatori più spessi, minori aree morte
- Passo anodico ottimizzato per spettroscopia (LAD) o imaging (WFM) tenendo conto dei limiti di potenza imposti al front-end (0.5 mW/canale per il LAD, poco più per il WFM) e della risoluzione energetica specificata
- Robustezza rispetto all'ambiente operativo, sia a terra che in orbita: aggiustamenti al layout e test di qualifica
- Corrente di leakage a inizio missione: $\leq 150 \text{ pA/cm}^2$

Disegno del rivelatore
Processo tecnologico

Prototipaggio con



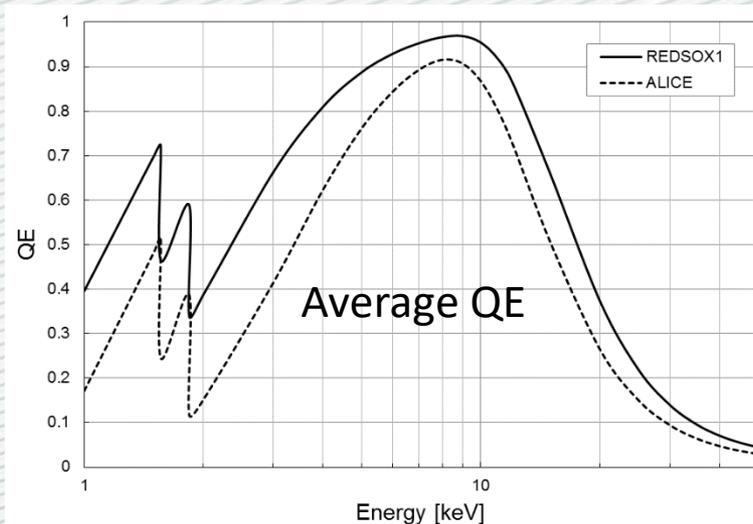
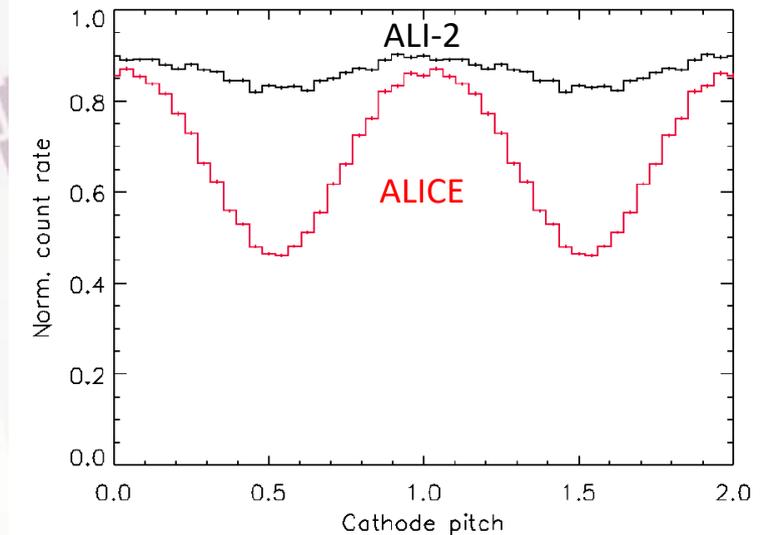
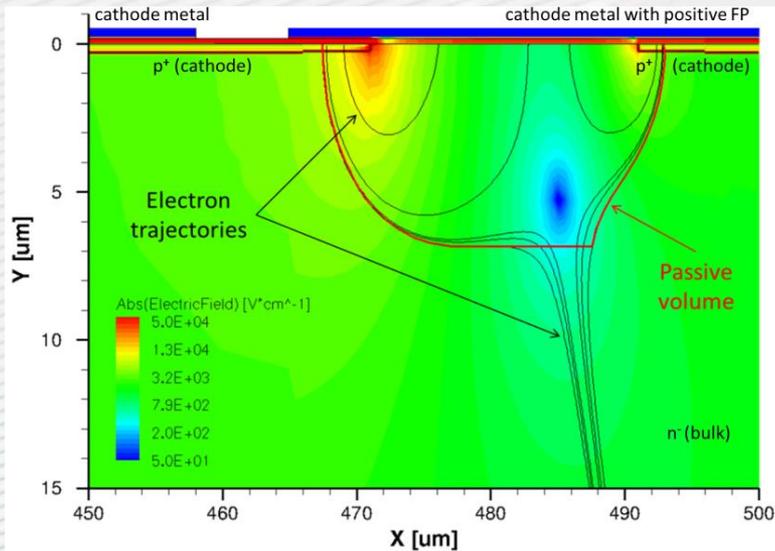
Consumo di potenza



Il consumo di potenza dipende dalla resistività degli impianti e dal layout del partitore integrato che alimenta i catodi di deriva

- semplificare il disegno del partitore riducendo le ridondanze permette di allungare le resistenze impiantate
- ridurre il drogaggio degli impianti

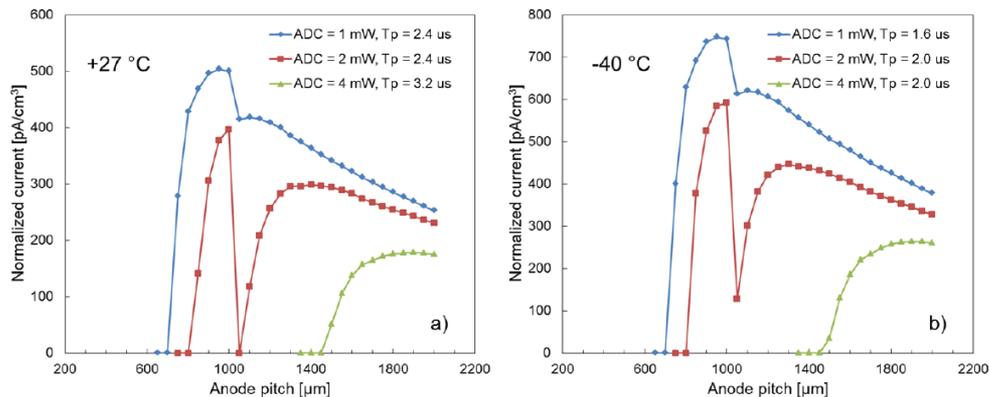
Area efficace (QE)



L'efficienza quantica è ridotta nelle regioni tra i catodi per via di una regione non svuotata legata alla carica nell'ossido che aiuta a ridurre il leakage superficiale. L'ottimizzazione si ottiene allargando e avvicinando tra loro i catodi

→ Attenzione al punch-through

Ottimizzazione del passo anodico

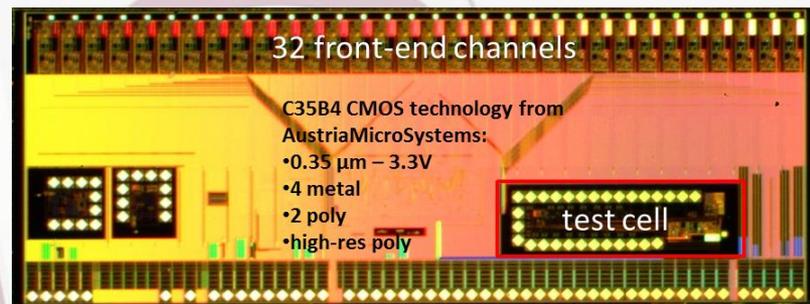
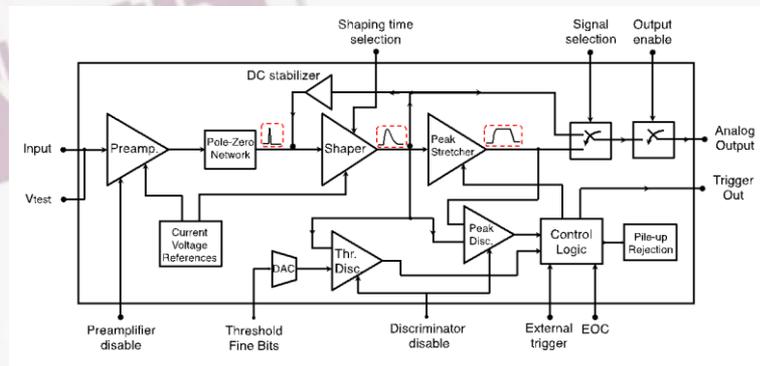


- Il passo anodico del LAD è stato ottimizzato stimando la capacità tramite simulazioni di dispositivo
- Si è assunto un consumo di potenza del canale di front-end dipendente dal passo anodico, potenza totale limitata al valore massimo specificato
- Si è scelto il passo che massimizza la corrente di leakage mantenendo la specifica di risoluzione energetica

→ Passo anodico LAD := 970 μm

Il passo anodico del WFM è stato ottimizzato allo stesso modo considerando anche i requisiti di imaging

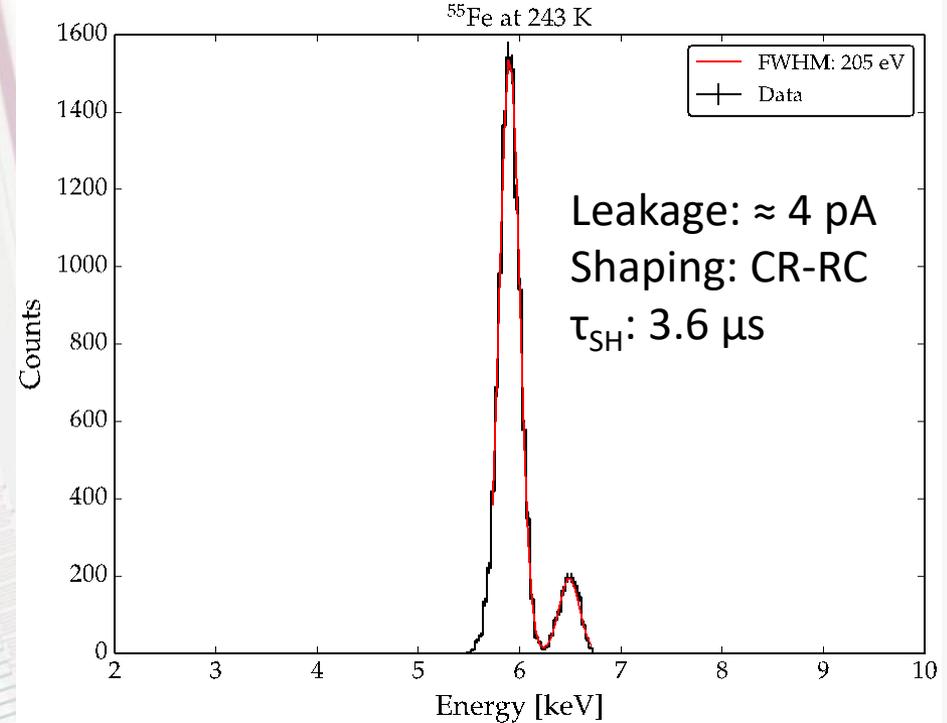
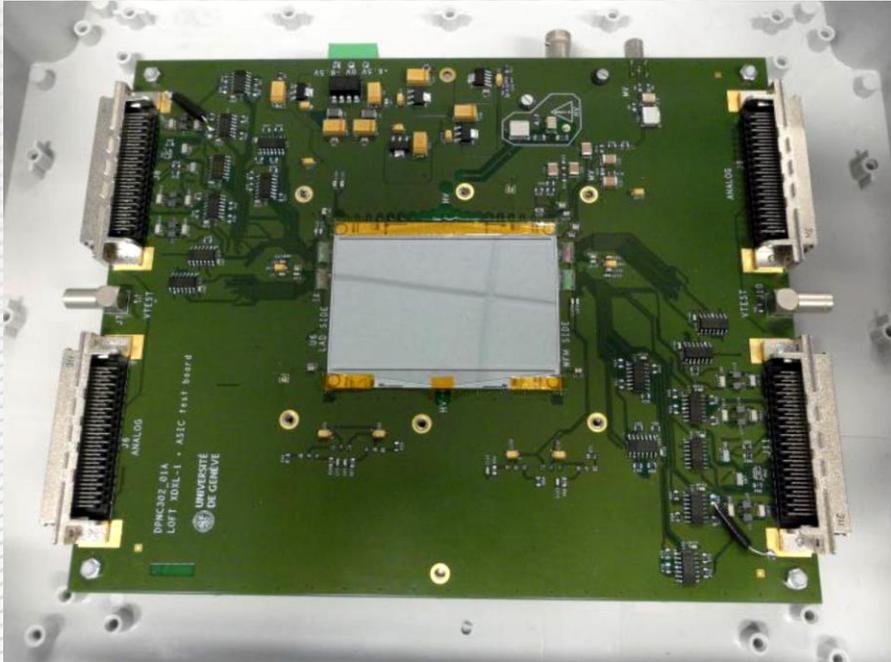
→ Passo anodico WFM := 145 μm



L'ASIC di front-end VEGA è stato progettato dopo aver ottimizzato il passo anodico

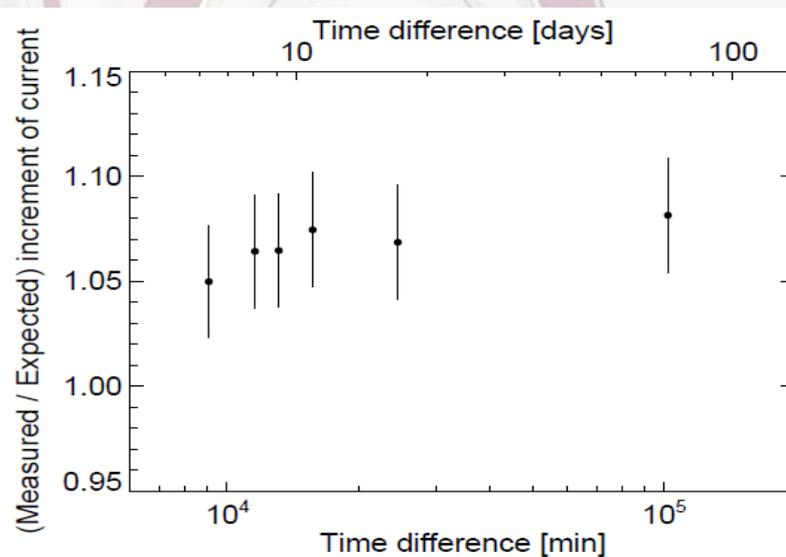
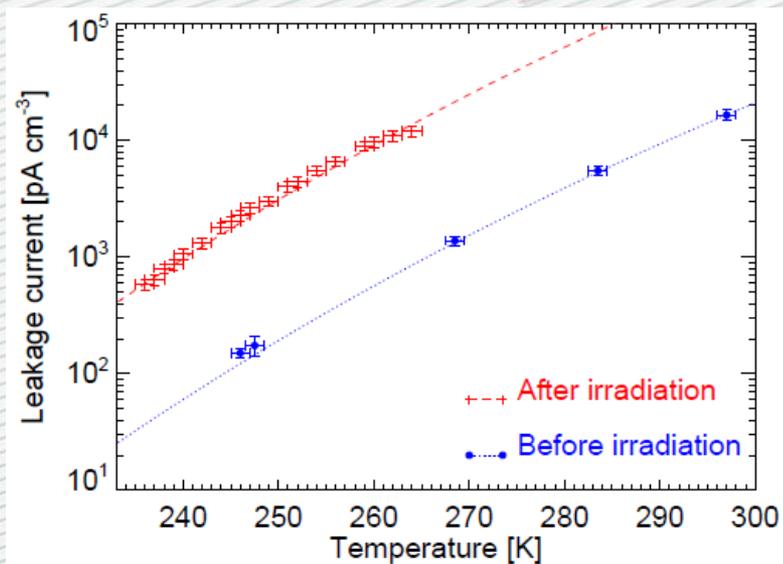
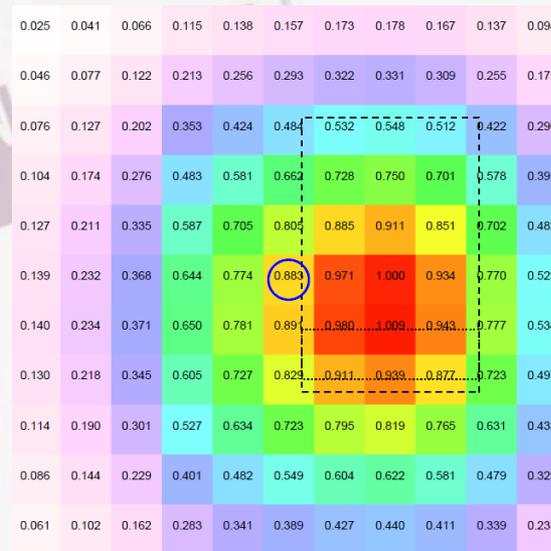
Consumo di Potenza di 418 μW/canale

LAD-SDD: prestazioni spettroscopiche

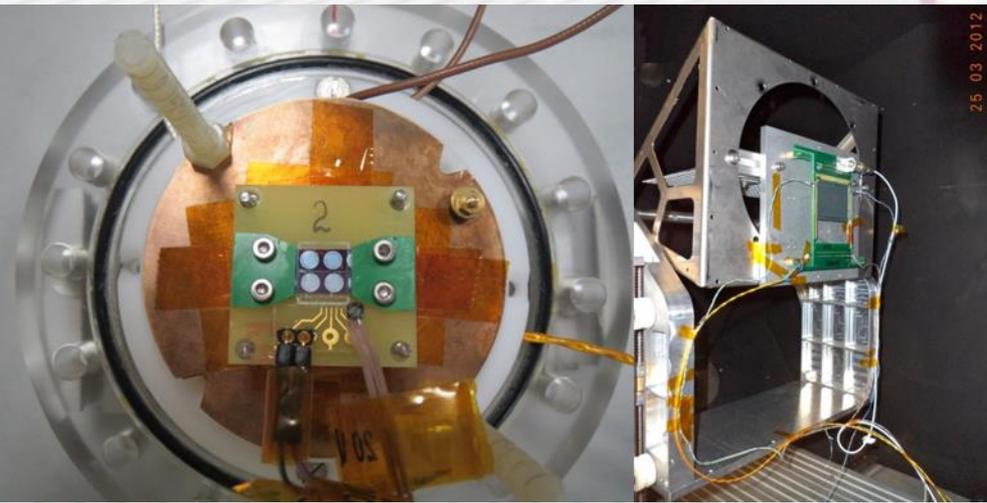


- Misure ottenute prima della riduzione del leakage tramite l'ottimizzazione del processo di produzione (FBK)
- Risoluzione energetica misurata a -30 °C: **205 eV FWHM a 5.9 keV** (ENC = 19.8 e^- RMS)

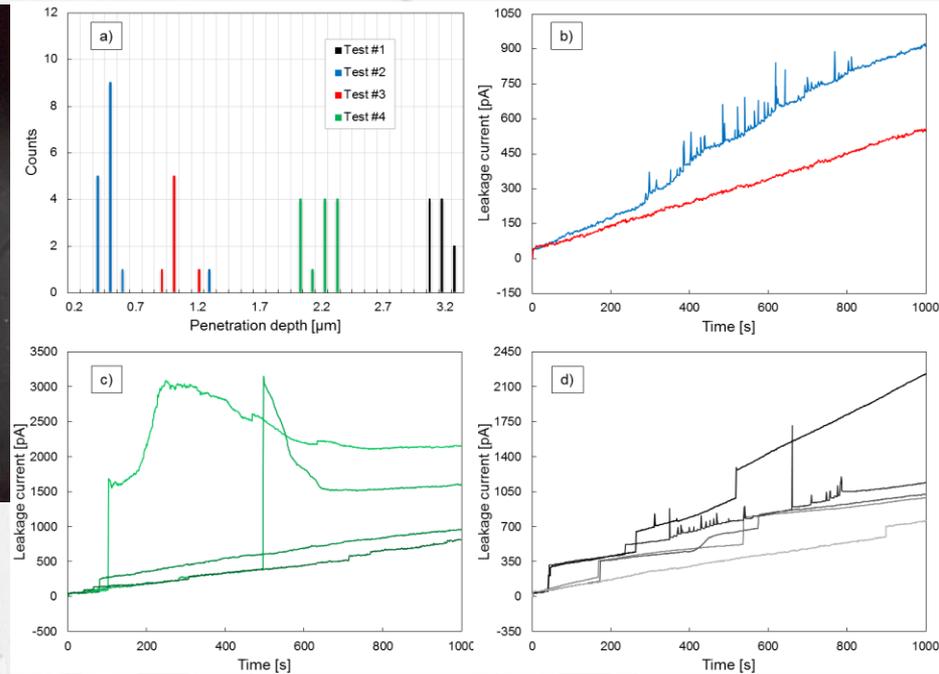
Qualifica spaziale: test di irraggiamento al PSI



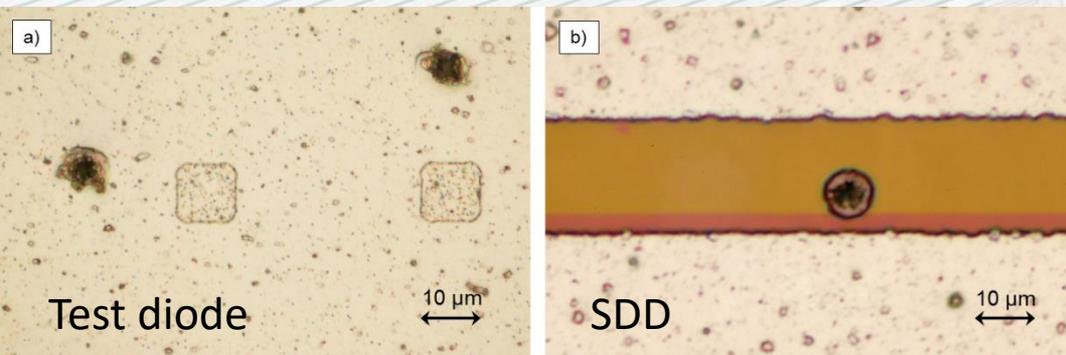
Qualifica spaziale: polvere e micrometeorite



Test eseguito alla Cosmic Dust Accelerator Facility del MPIK in Heidelberg usando particelle sferiche di ferro (diametro di qualche μm) con profondità di penetrazione simili a quelle attese in orbita



- ✓ Soglia di danno misurata compatibile con gli strati morti del rivelatore
- ✓ L'impatto aumenta poco il leakage, circa 1 nA a 20°C che scala con la temperatura
- ✓ Il numero di impatti previsti sul LAD durante la missione è esiguo (< 10)
→ **degradazione trascurabile della prestazione**



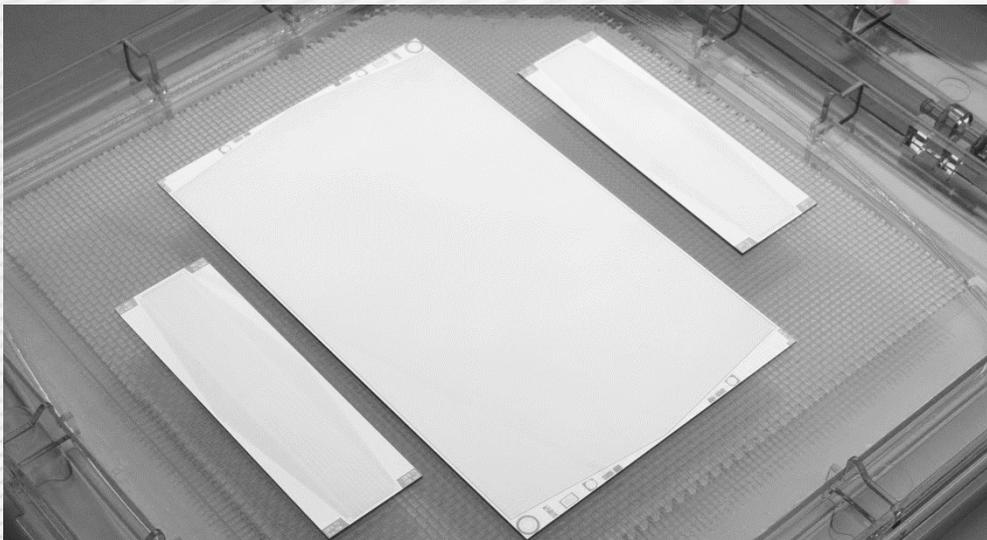
SDD a confronto



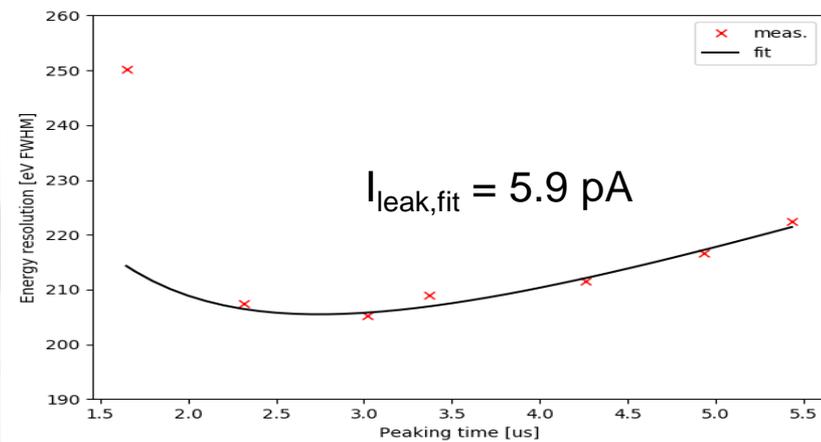
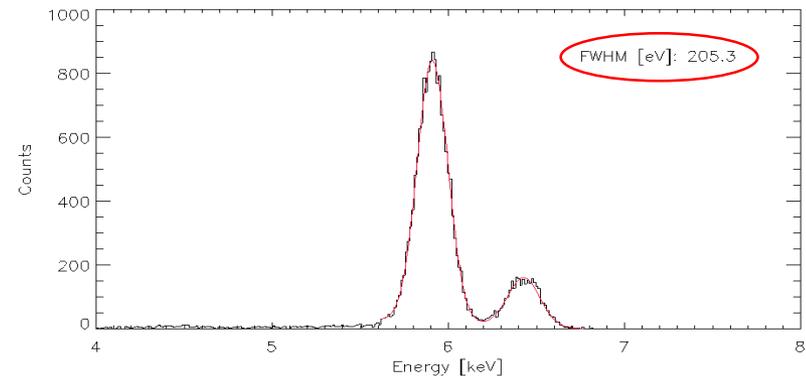
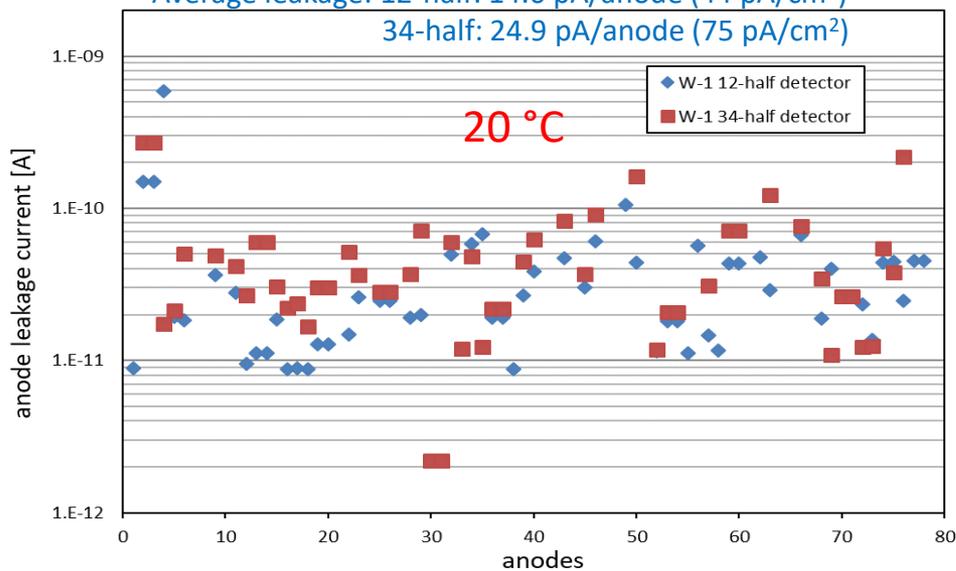
SDD a confronto



Produzione 2018: ottimizzazione leakage



Average leakage: 12-half: 14.6 pA/anode (44 pA/cm²)
34-half: 24.9 pA/anode (75 pA/cm²)



- Rivelatore in camera climatica a +2 °C per simulare il leakage a fine missione
- Sistema di misura non ancora ottimizzato: presenza di disturbi usando tempi di formatura < 2 μs

Sviluppo parallelo delle SDD

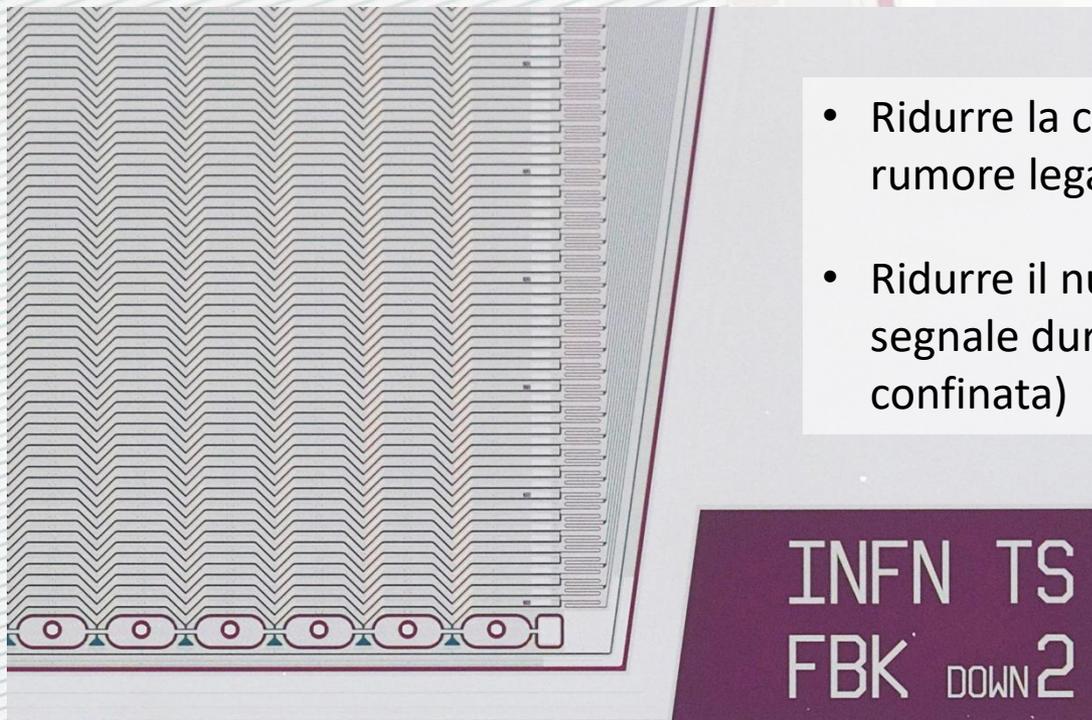
- Le prestazioni spettroscopiche con VEGA sono in linea con le necessità di eXTP, però non c'è un margine adeguato per far fronte a problemi di sistema
- L'ASIC di front-end di eXTP è responsabilità francese (CEA Paris-Saclay/IRFU): front-end basato sull'ASIC IDeF-X, prestazioni richieste non ancora raggiunte

→ Si può intervenire sul rivelatore per facilitare il compito degli elettronici?

Sviluppo parallelo delle SDD

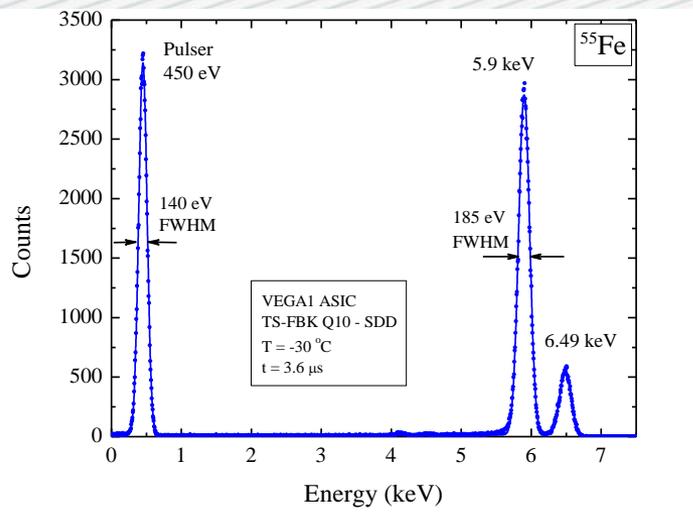
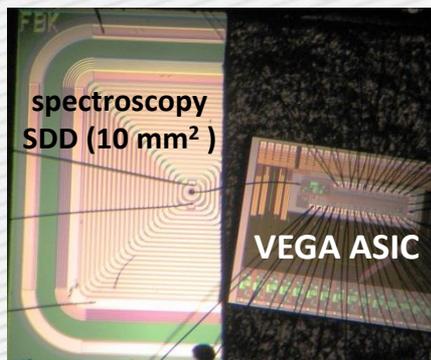
- Le prestazioni spettroscopiche con VEGA sono in linea con le necessità di eXTP, però non c'è un margine adeguato per far fronte a problemi di sistema
- L'ASIC di front-end di eXTP è responsabilità francese (CEA Paris-Saclay/IRFU): front-end basato sull'ASIC IDeF-X, prestazioni richieste non ancora raggiunte

→ Si può intervenire sul rivelatore per facilitare il compito degli elettronici?

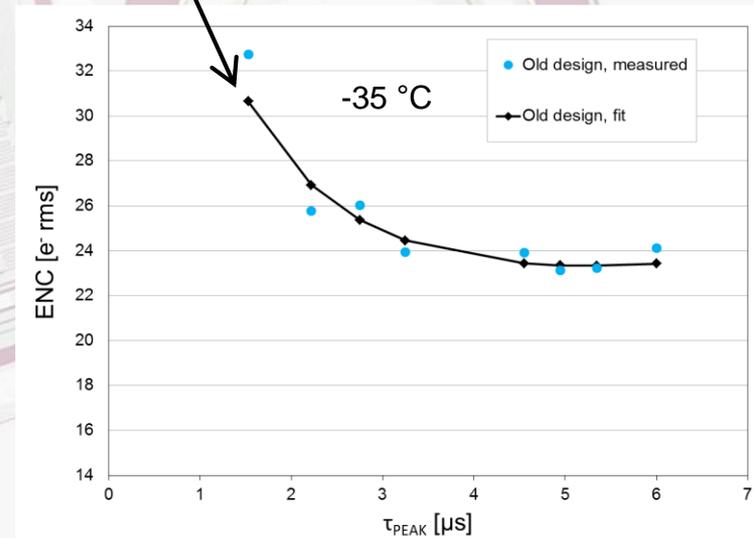
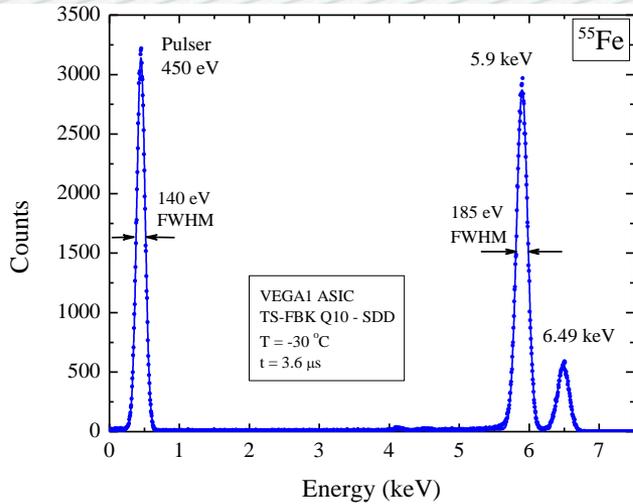
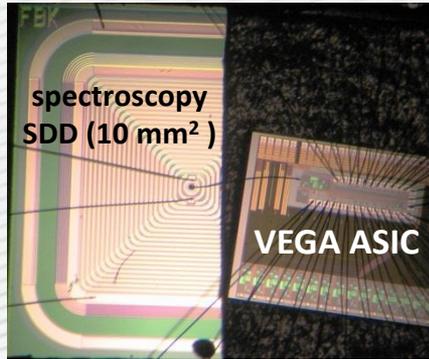


- Ridurre la capacità dell'anodo per ridurre il rumore legato all'elettronica di front-end
- Ridurre il numero di anodi interessati dal segnale durante una acquisizione (deriva confinata)

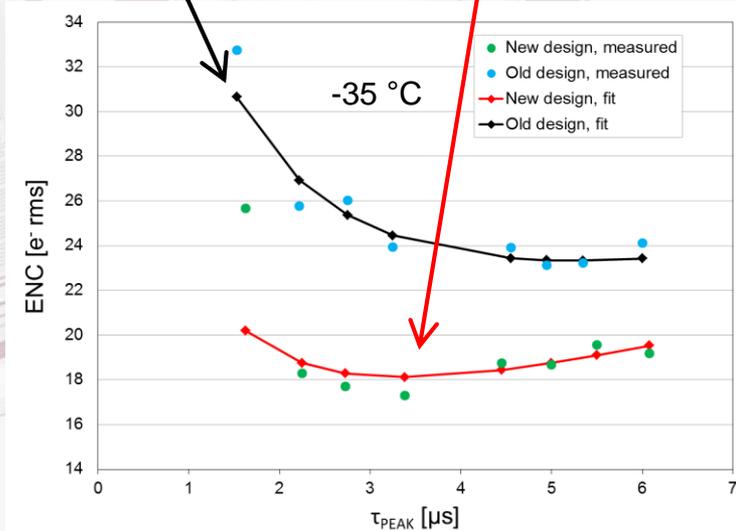
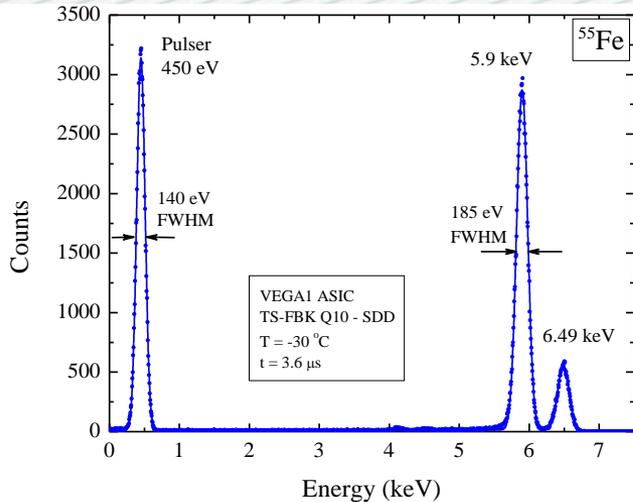
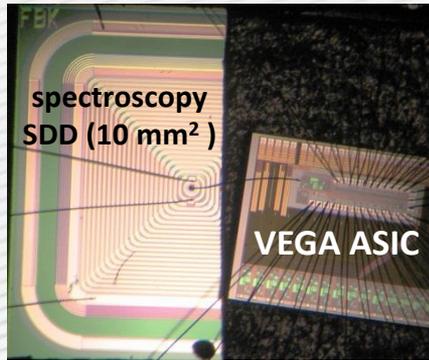
Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 1



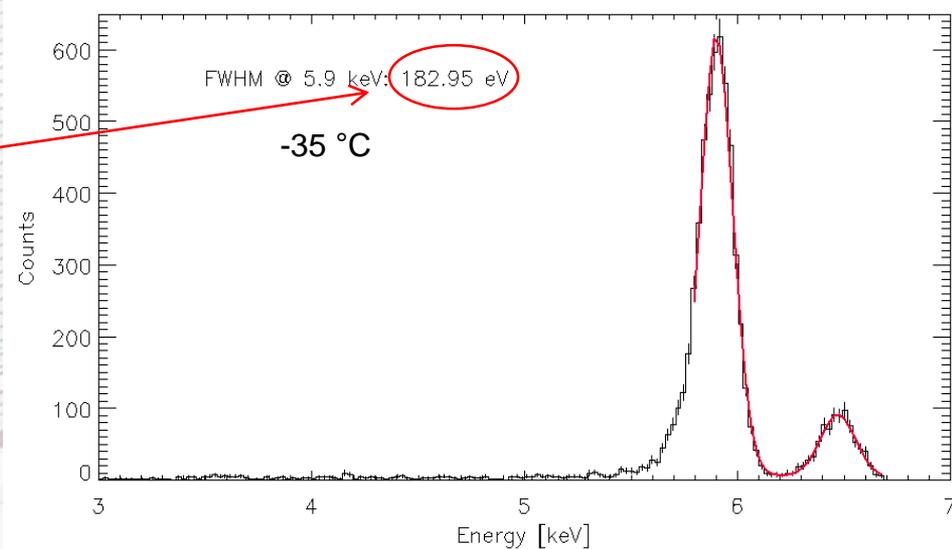
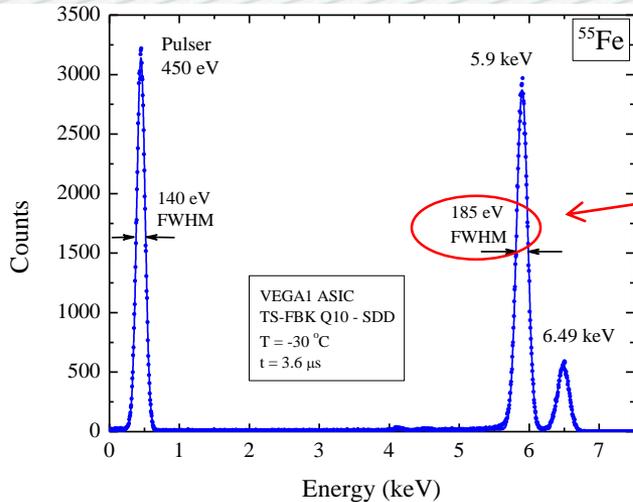
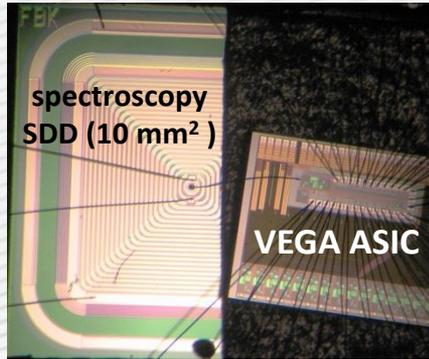
Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 1



Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 1



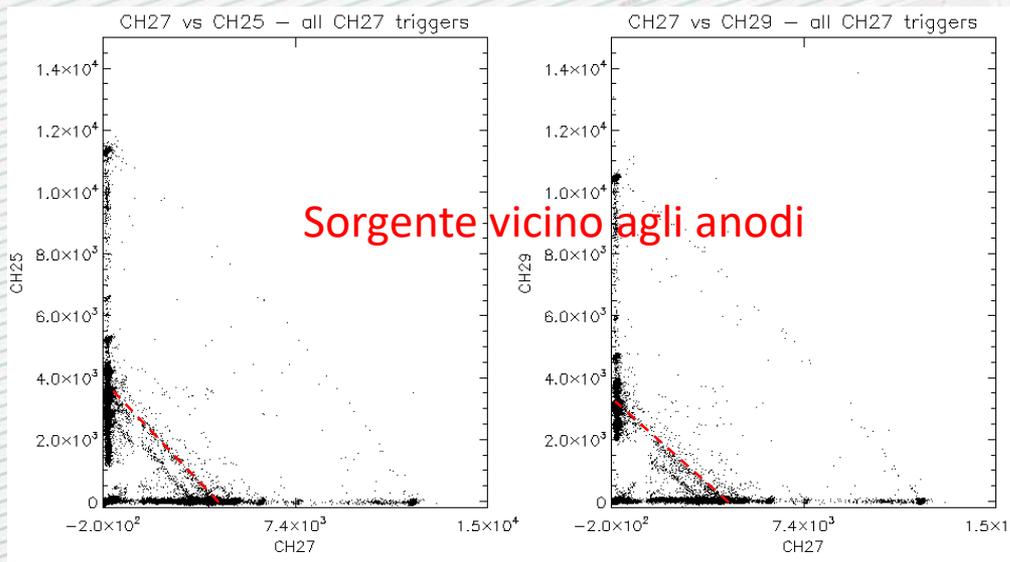
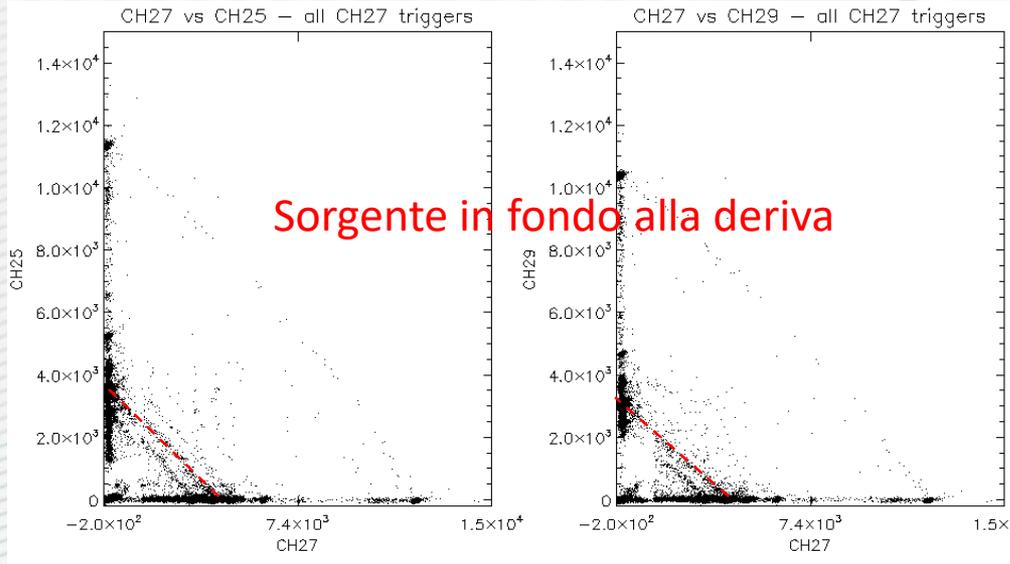
Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 1



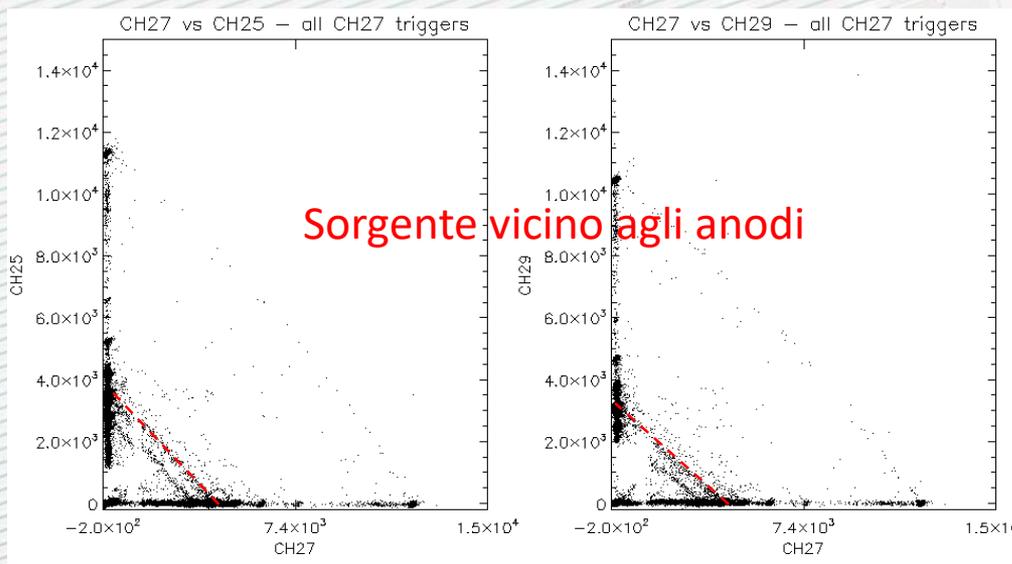
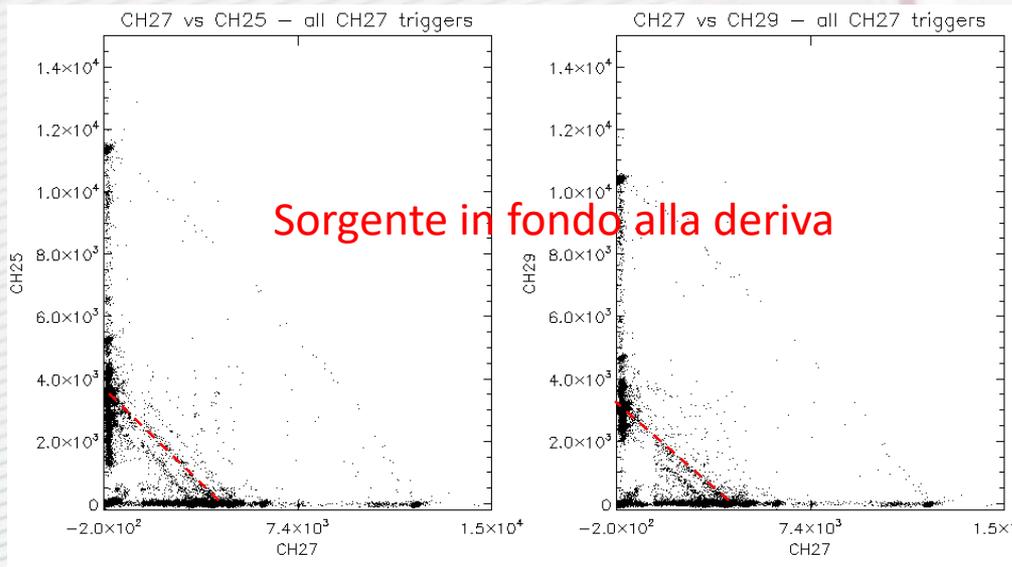
Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 2

Test di confinamento della carica

- Tre anodi consecutivi collegati a tre canali (25, 27 e 29) del VEGA, trigger sul canale centrale
- Sorgente di ^{241}Am posizionata ai due estremi della deriva
- Con illuminazione omogenea, per eXTP ci si aspetta per 60% di eventi con segnale su un solo anodo (con passo da $853\ \mu\text{m}$ misurati 50% dal fondo della deriva, 83% vicino agli anodi)
- Analisi dati per selezionare eventi singoli, doppi e tripli



Sviluppo parallelo: risultati preliminari - 2



Test di confinamento della carica

- Tre anodi consecutivi collegati a tre canali (25, 27 e 29) del VEGA, trigger sul canale centrale
- Sorgente di ^{241}Am posizionata ai due estremi della deriva
- Con illuminazione omogenea, per eXTP ci si aspetta per 60% di eventi con segnale su un solo anodo (con passo da $853\ \mu\text{m}$ misurati 50% dal fondo della deriva, 83% vicino agli anodi)
- Analisi dati per selezionare eventi singoli, doppi e tripli

→ 94.5 % eventi singoli

→ 4.8 % eventi doppi

→ 0.7 % eventi tripli (compatibile con selezione a 3σ sui piedistalli)

Conclusioni

- I sensori di LAD e WFM in eXTP sono basati su tecnologia sviluppata dall'INFN in collaborazione con FBK e con l'indispensabile contributo di INAF, PoliMI e UniPV
- Anche se a buon punto, lo sviluppo dei rivelatori di LAD e WFM hanno bisogno di alcune verifiche (efficienza ai bordi, prototipi della WFM-SDD a piena grandezza ancora da produrre)
- Abbiamo in cantiere ulteriori sviluppi delle SDD che possono garantire margini di prestazione qualora emergessero problemi a livello di sistema
- Realizzare il LAD ed il WFM di eXTP è comunque una sfida difficile, ma abbiamo l'esperienza necessaria per affrontare l'impresa