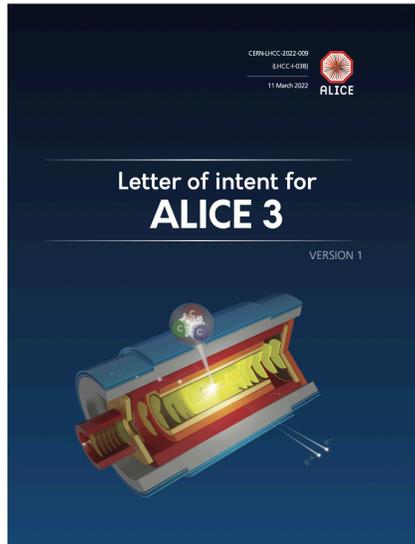
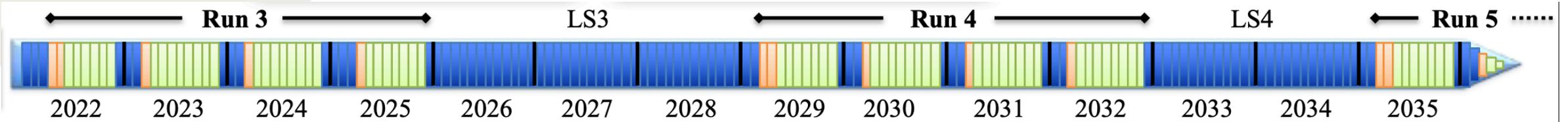


ALICE 3 TOF: attività in corso e prospettive future

S. BUFALINO

RIUNIONE REFEREE ALICE – 22 LUGLIO 2022

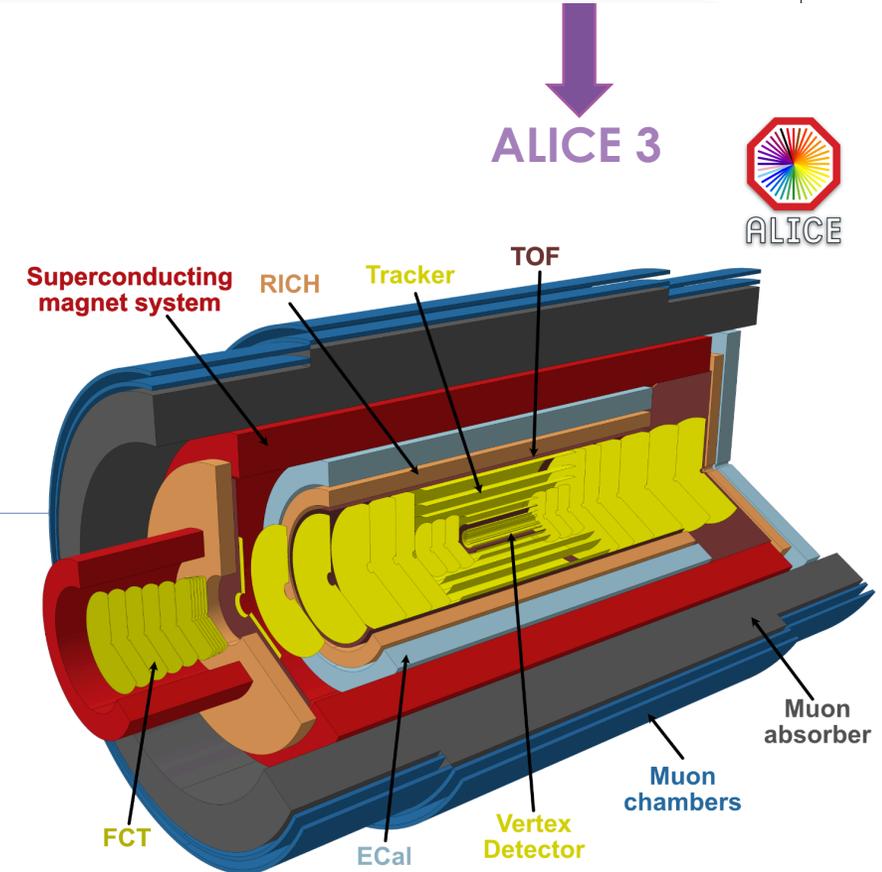
ALICE 3: a next generation heavy ion experiment



- Ampia accettazione: $(|\eta| < 4)$ coverage
- Tracciatore molto leggero: 12 layer cilindrici basati su sensori CMOS
- Alta risoluzione in termini di tracciamento e vertexing

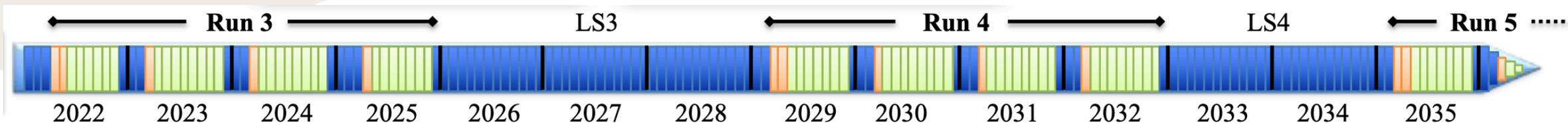
Particle IDentification:

- TOF con sensori al silicio per adroni e ID di elettroni a basso p_T con ~ 20 ps di risoluzione temporale
- RICH per estendere il « p_T reach»
- Shower Pixel Detector per fotoni ad alto p_T

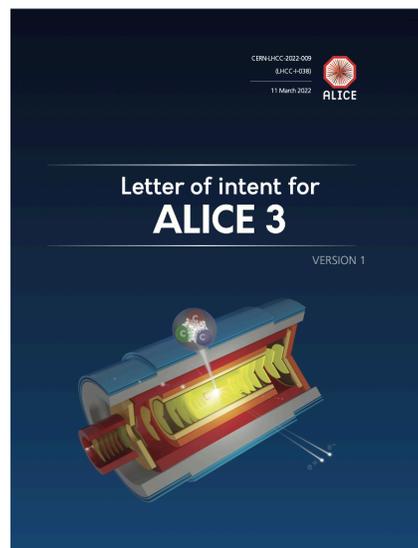


<https://cds.cern.ch/record/2803563>

ALICE 3: a next generation heavy ion experiment



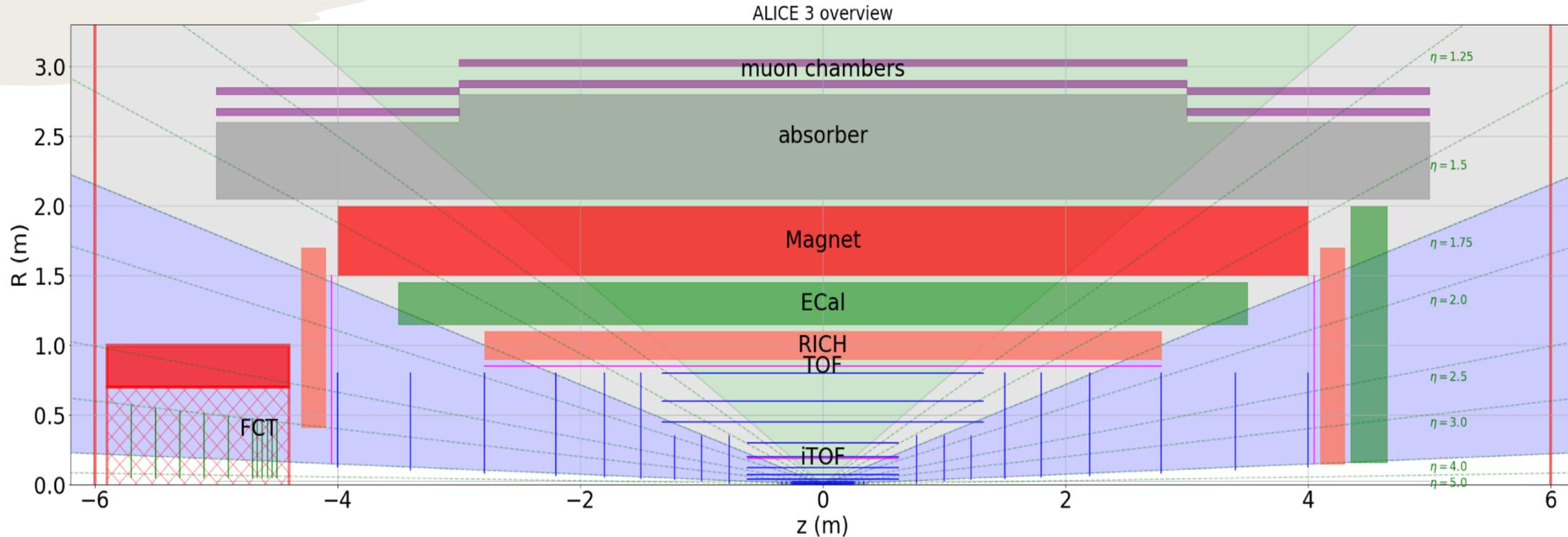
Estratto della valutazione positiva del Large Hadron Collider Committee del 9-10 marzo scorso



The LHCC endorses the Review Panel recommendation that the "suggested R&D programs is vital to corroborate the detector design outlined in the Letter of Intent and to enter the construction phase of the detector in time for the physics exploration phase of ALICE-3 around 2035". In this context, the committee **notes** that the area of monolithic timing detectors and monolithic photon sensors is of general interest for future high-energy physics projects and beyond, and that a vigorous R&D program is important to bring the technology to the point where it meets the technical specifications required for ALICE3 within the foreseen detector cost.

<https://cds.cern.ch/record/2803563>

ALICE 3: detector concept



Barrel TOF ($|\eta| < 1.75$):

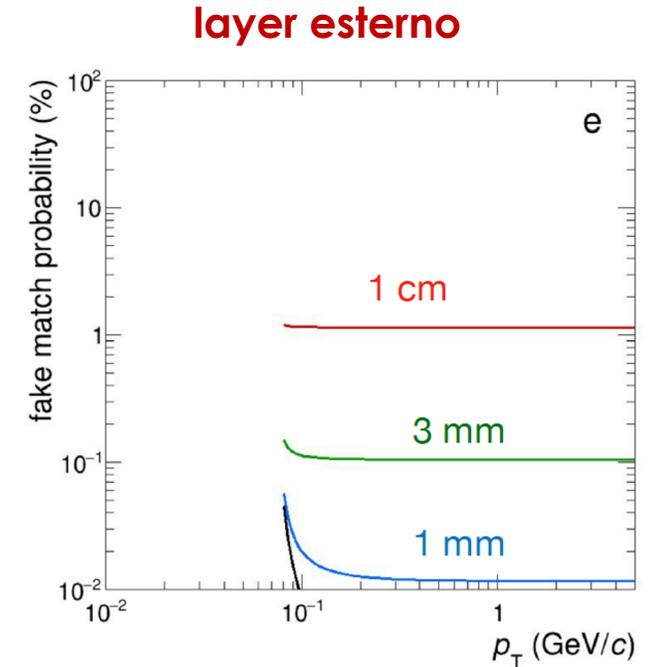
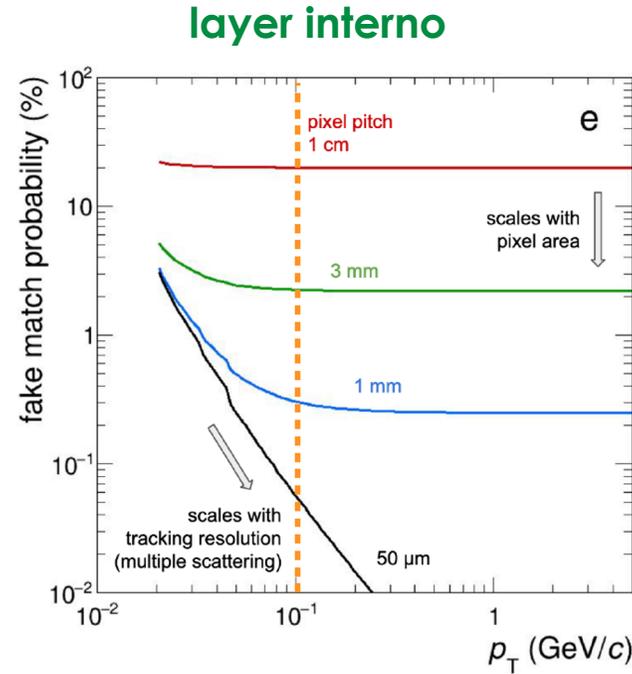
- Layer interno $R = 19$ cm
- Layer esterno $R = 85$ cm

Forward TOF ($1.75 < \eta < 4$ and $-4 < \eta < -1.75$):

- Raggio interno = 15 cm
- Raggio interno = 150 cm
- Posizione longitudinale = ± 4.05 m

ALICE 3 TOF: specifiche

| | Inner TOF | Outer TOF | Forward TOF |
|---|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Radius (m) | 0.19 | 0.85 | 0.15–1.5 |
| z range (m) | -0.62–0.62 | -2.79–2.79 | 4.05 |
| Surface (m ²) | 1.5 | 30 | 14 |
| Granularity (mm ²) | 1 × 1 | 5 × 5 | 1 × 1 to 5 × 5 |
| Hit rate (kHz/cm ²) | 74 | 4 | 122 |
| NIEL (1 MeV _{neq} /cm ²) / month | 1.3 · 10 ¹¹ | 6.2 · 10 ⁹ | 2.1 · 10 ¹¹ |
| TID (rad) / month | 4 · 10 ³ | 2 · 10 ² | 6.6 · 10 ³ |
| Material budget (%X ₀) | 1–3 | 1–3 | 1–3 |
| Power density (mW/cm ²) | 50 | 50 | 50 |
| Time resolution (ps) | 20 | 20 | 20 |



- pixel pitch con dimensioni < 1 mm non sono necessari per il layer interno del TOF (per $p_T < 100$ MeV/c dominati da multiple scattering);
- Nel layer esterno del TOF, pixel pitch da 3 mm permettono di contenere la non corretta identificazione di e/ π

ALICE 3 TOF: contributo italiano e attività svolte

Settembre 2020: formazione di un Working Group dedicato al R&D del TOF

- **3 coordinatori italiani:** A. Alici (Bologna), S. Bufalino (Torino), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** Bologna, Torino, Trieste, Trento con interesse da parte di altre sezioni come Bari, Salerno, Catania e LNF

Focus dell'attività di R&D del 2021 finalizzata alla stesura della Lol che è stata approvata a marzo del 2022

Simulazione di sensori

Caratterizzazione
di sensori

Micro-elettronica

ALICE 3 TOF: contributo italiano e attività svolte

Settembre 2020: formazione di un Working Group dedicato al R&D del TOF

- **3 coordinatori italiani:** A. Alici (Bologna), S. Bufalino (Torino), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** Bologna, Torino, Trieste, Trento con interesse da parte di altre sezioni come Bari, Salerno, Catania e LNF

Focus dell'attività di R&D del 2021 finalizzata alla stesura della Lol che è stata approvata a marzo del 2022

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD and Garfield++ per determinare un modello realistico della risposta del sensore
- Tecnologie proposte nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno e LGADs**

Caratterizzazione
di sensori

Micro-elettronica

ALICE 3 TOF: contributo italiano e attività svolte

Settembre 2020: formazione di un Working Group dedicato al R&D del TOF

- **3 coordinatori italiani:** A. Alici (Bologna), S. Bufalino (Torino), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** Bologna, Torino, Trieste, Trento con interesse da parte di altre sezioni come Bari, Salerno, Catania e LNF

Focus dell'attività di R&D del 2021 finalizzata alla stesura della Lol che è stata approvata a marzo del 2022

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD and Garfield++ per determinare un modello realistico della risposta del sensore
- Tecnologie proposte nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno e LGADs**

Caratterizzazione di sensori

- Test in laboratorio di sensori disponibili nelle sedi coinvolte (sinergia con altri progetti come ARCADIA)
- Test beam condotti a novembre 2021 per caratterizzazione dei sensori con MIPs al CERN PS. Sono in corso in questi giorni altri test al CERN PS

Micro-elettronica

ALICE 3 TOF: contributo italiano e attività svolte

Settembre 2020: formazione di un Working Group dedicato al R&D del TOF

- **3 coordinatori italiani:** A. Alici (Bologna), S. Bufalino (Torino), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** Bologna, Torino, Trieste, Trento con interesse da parte di altre sezioni come Bari, Salerno, Catania e LNF

Focus dell'attività di R&D del 2021 finalizzata alla stesura della Lol che è stata approvata a marzo del 2022

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD and Garfield++ per determinare un modello realistico della risposta del sensore
- Tecnologie proposte nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno e LGADs**

Caratterizzazione di sensori

- Test in laboratorio di sensori disponibili nelle sedi coinvolte (sinergia con altri progetti come ARCADIA)
- Test beam condotti a novembre 2021 per caratterizzazione dei sensori con MIPs al CERN PS. Sono in corso in questi giorni altri test al CERN PS

Micro-elettronica

- Supporto per studiare l'interfaccia sensore-elettronica e nell'implementazione delle strutture di test
- Ampio spettro di competenze disponibile nelle sezioni coinvolte a supporto del R&D

Sensori CMOS e capacità di timing

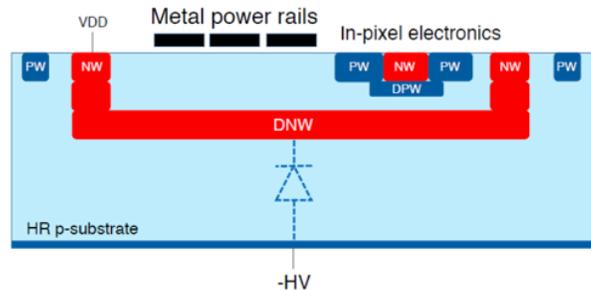
Sono in corso vari progetti per sviluppo di monolitici ottimizzati in termini di risoluzione temporale:

- High Voltage CMOS (HV-CMOS)
- processo SiGe: progetto MonPicoAD ATTRACT

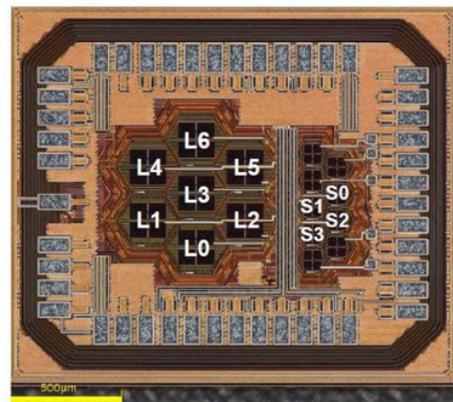
<https://attract-eu.com/showroom/project/monpicoad-a-monolithic-picosecond-avalanche-detector/>

- CMOS FD-MAPS con elettrodi di piccole dimensione: progetto FASTPIX

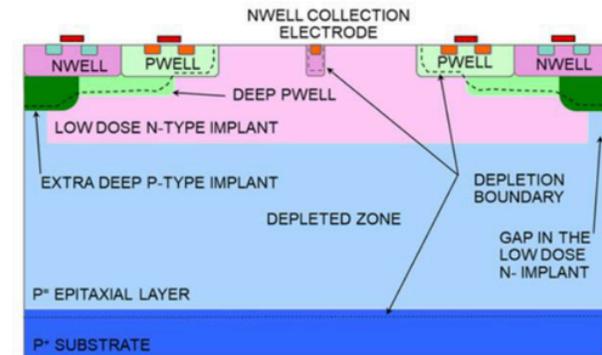
<https://phase1.attract-eu.com/showroom/project/sub-nanosecond-radiation-tolerant-cmos-pixel-sensors-fastpix/>



Y. Degerli et al., 2020 JINST 15 P06011



G. Iacobucci et al., 2019 JINST 14 P11008



T. Kugathan et al., Nucl. Inst. Meth. A Vol. 979, Nov. 2020

Allo stato dell'arte raggiungere 20 ps di risoluzione con MAPS è «challenging».

Sensori CMOS e aggiunta di un guadagno

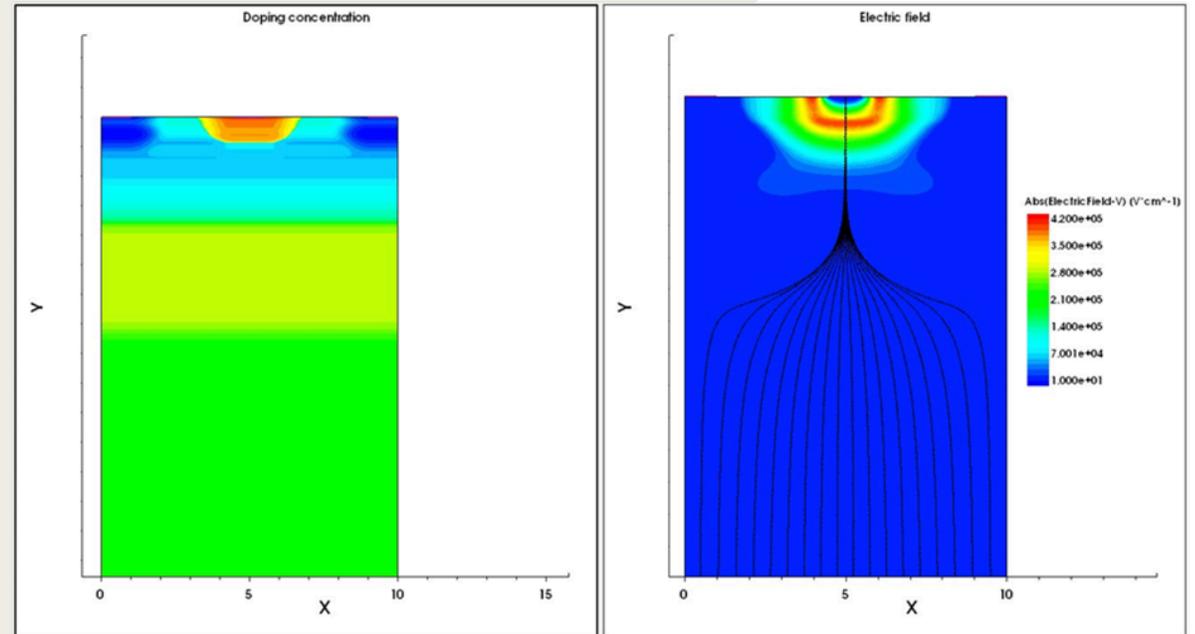
L'aggiunta di un guadagno interno al sensore CMOS ridurrà gli effetti del rumore dovuto all'elettronica che sono più rilevanti per i sensori più grandi

Fattibilità del processo dimostrata da PANASONIC (brevetto EP 3 448 018 A1)

Diverse attività di R&D in corso nella comunità scientifica:

- G. Iacobucci et al. Uni. Ginevra (brevetto EP 3 654 376 A1):
 - Target: risoluzione pari a 1 ps
- Università di Vienna:
 - Processo: CMOS 0.35 μm
 - Spessore attivo: 12 μm
 - Facilmente implementabile in diversi processi di fabbricazione esistenti

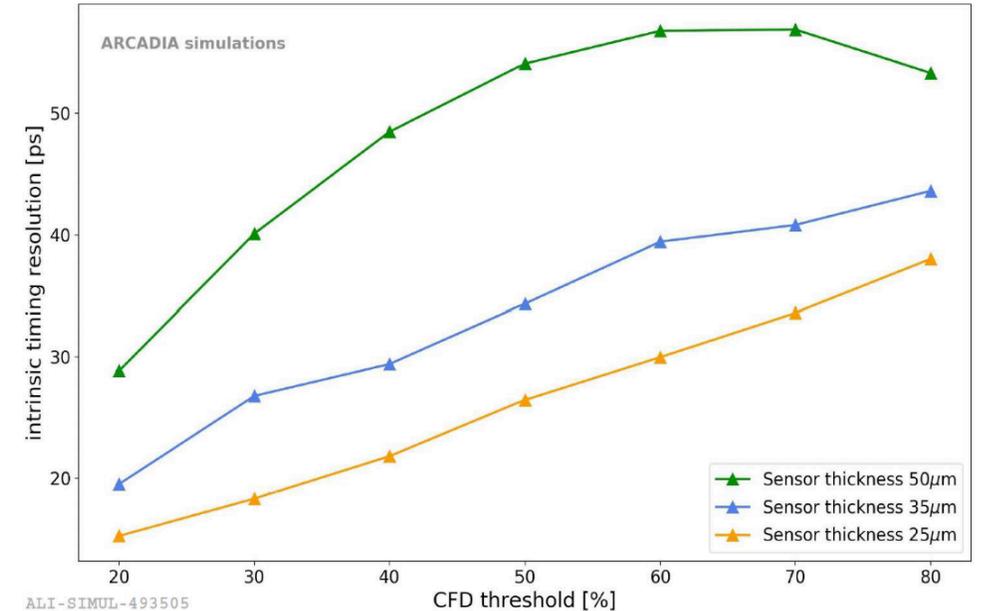
Preliminary simulations with the 110 nm process used by ARCADIA



ALICE 3 TOF: simulazione di sensori CMOS

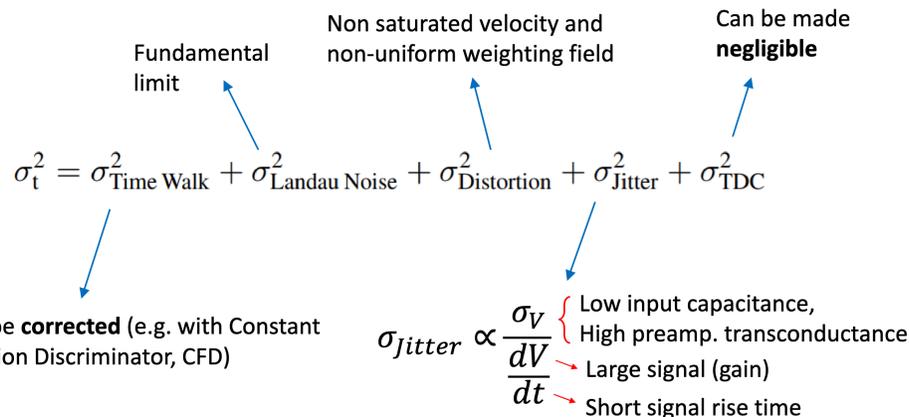
- Simulazione Monte Carlo di pixels con pitch da 10µm e 50µm e spessore pari a 25, 35 e 50 µm:
 - La non uniformità del Weighting Potential limita la risoluzione dei pixel con **pitch da 10µm a 80 – 100ps**
 - Miglioramento netto con **pitch da 50µm**, raggiungendo una **componente del «Landau noise» dell'ordine dei 20-30 ps**

50 µm pitch, V_{well}=3.3 V, V_{back} = V_{pw} @ 10 mW/cm²
Epitaxial layer thickness 8 µm



L. De Cilladi

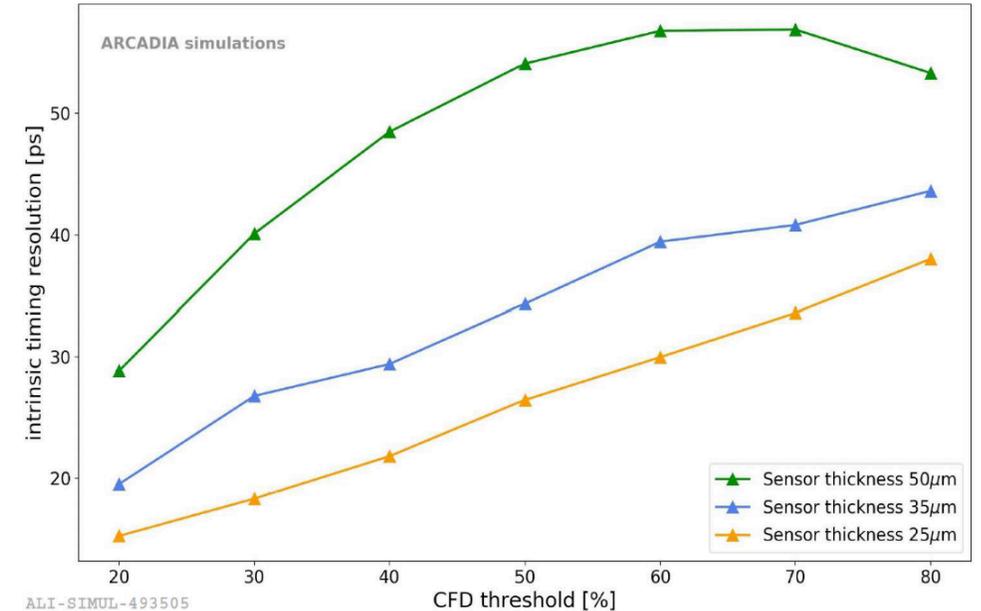
Time resolution with 10 µm pixels varying thickness (25 µm, 35 µm, 50 µm)



ALICE 3 TOF: simulazione di sensori CMOS

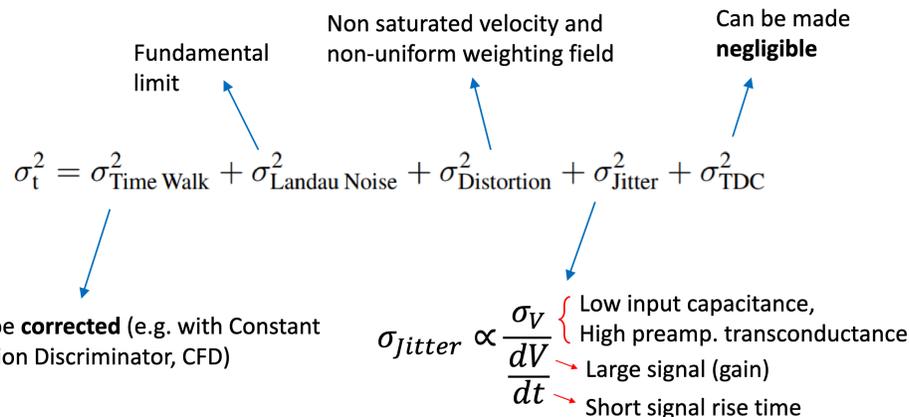
- Simulazione Monte Carlo di pixels con pitch da 10 μm e 50 μm e spessore pari a 25, 35 e 50 μm :
 - La non uniformità del Weighting Potential limita la risoluzione dei pixel con **pitch da 10 μm a 80 – 100ps**
 - Miglioramento netto con **pitch da 50 μm** , raggiungendo una **componente del «Landau noise» dell'ordine dei 20-30 ps**
- **Aspetti da tenere in considerazione:**
 - in sensori sottili, la componente dovuta al jitter dell'elettronica sarebbe dominante
 - Dovremmo usare pad di sensori più grandi di 50 μm per ottimizzare l'efficienza in termini di area con amplificatori a basso rumore nel processo a 110nm.

**50 μm pitch, $V_{\text{well}}=3.3\text{ V}$, $V_{\text{back}} = V_{\text{pw}}$ @ 10 mW/cm²
Epitaxial layer thickness 8 μm**



L. De Cilladi

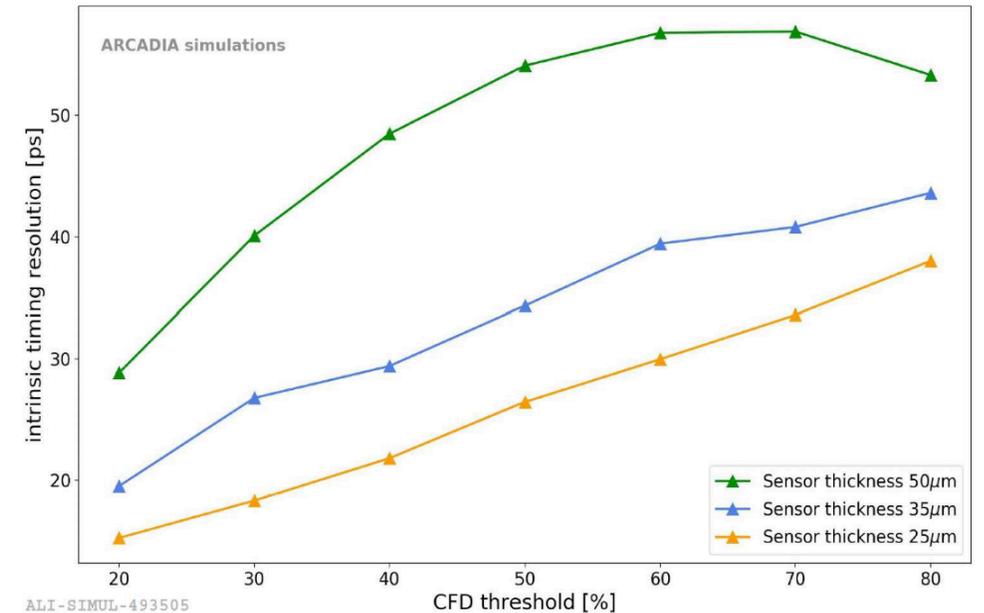
Time resolution with 10 μm pixels varying thickness (25 μm , 35 μm , 50 μm)



ALICE 3 TOF: simulazione di sensori CMOS

- Simulazione Monte Carlo di pixels con pitch da $10\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$ e spessore pari a 25 , 35 e $50\mu\text{m}$:
 - La non uniformità del Weighting Potential limita la risoluzione dei pixel con **pitch da $10\mu\text{m}$ a $80 - 100\text{ps}$**
 - Miglioramento netto con **pitch da $50\mu\text{m}$** , raggiungendo una **componente del «Landau noise» dell'ordine dei $20-30\text{ps}$**
- **Aspetti da tenere in considerazione:**
 - in sensori sottili, la componente dovuta al jitter dell'elettronica sarebbe dominante
 - Dovremmo usare pad di sensori più grandi di $50\mu\text{m}$ per ottimizzare l'efficienza in termini di area con amplificatori a basso rumore nel processo a 110nm .
- ❖ **Domande a cui dare una risposta:**
 - ❖ qual è il fattore di scaling dei risultati ottenuti con pad da $50\mu\text{m}$ per pad di dimensioni superiori?
 - ❖ Qual'è il modo migliore di aggiungere del guadagno in sensori monolitici per ridurre il jitter dell'elettronica?

$50\mu\text{m}$ pitch, $V_{\text{well}}=3.3\text{ V}$, $V_{\text{back}} = V_{\text{pw}}$ @ 10 mW/cm^2
Epitaxial layer thickness $8\mu\text{m}$

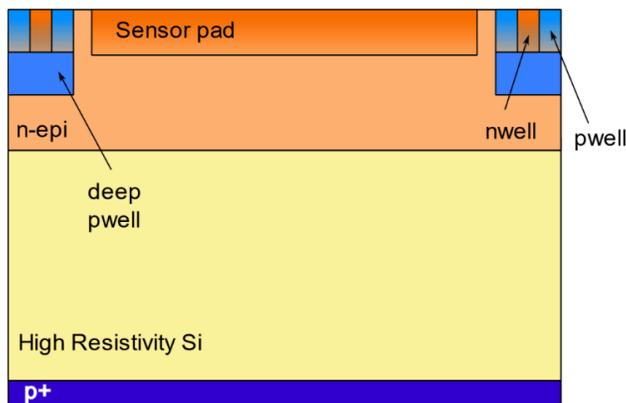


L. De Cilladi

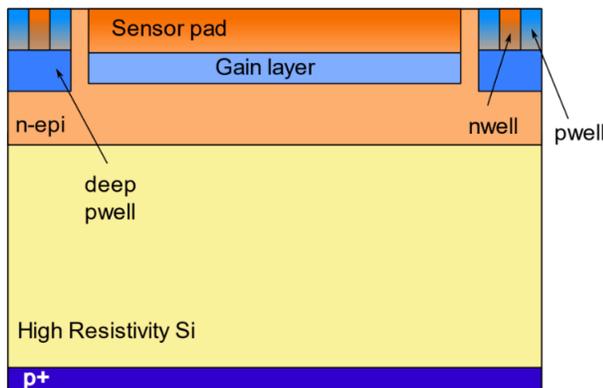
Time resolution with $10\mu\text{m}$ pixels varying thickness
($25\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$)

ALICE 3 TOF: simulazione di sensori CMOS

ARCADIA pad sensor



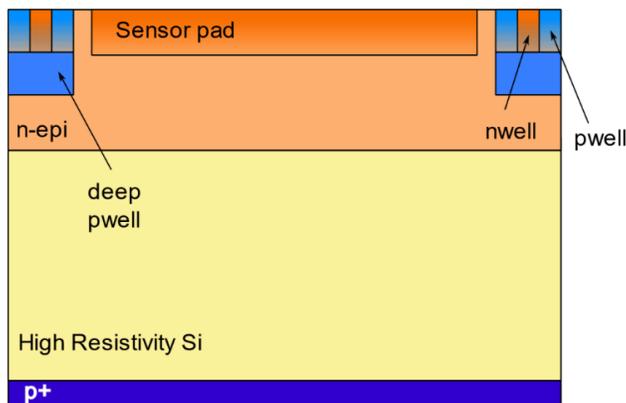
ARCADIA pad sensor with gain



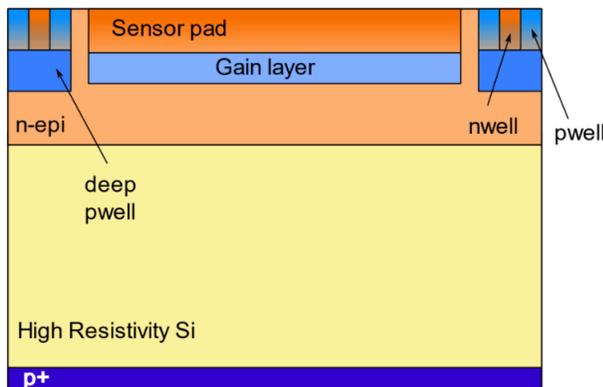
- Design di un layer di guadagno plug-in utilizzando la tecnologia dei MAPS di ARCADIA (110 nm)
- **Fattibilità già discussa con Lfoundry**
- Run di produzione dedicato per ottimizzare la risoluzione temporale (**motivo dello sblocco s.j di 30 keuro**)

ALICE 3 TOF: simulazione di sensori CMOS

ARCADIA pad sensor

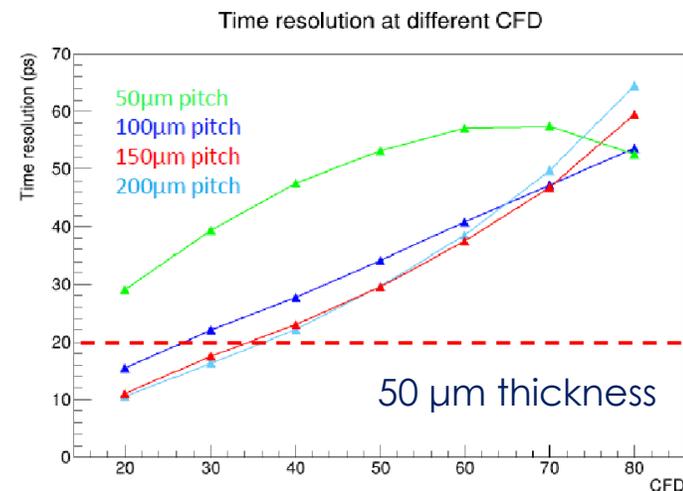
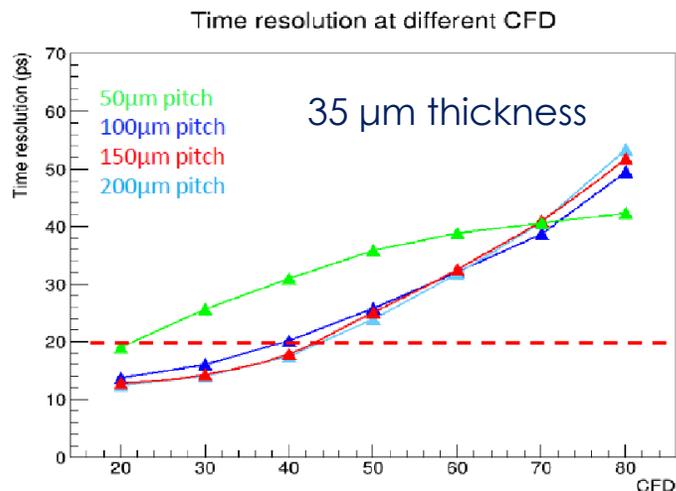
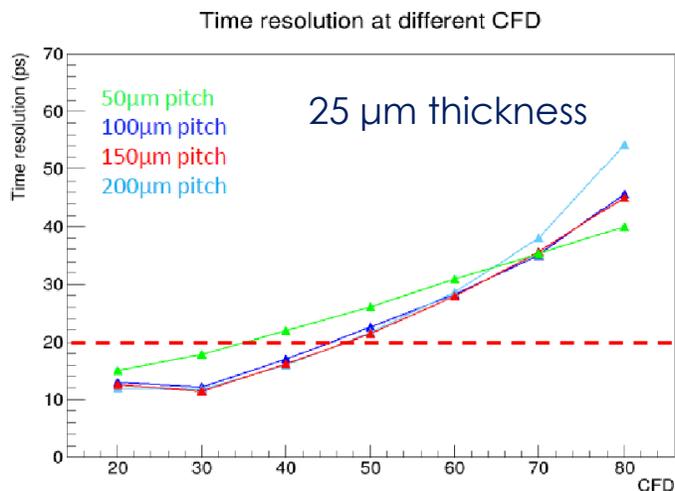


ARCADIA pad sensor with gain



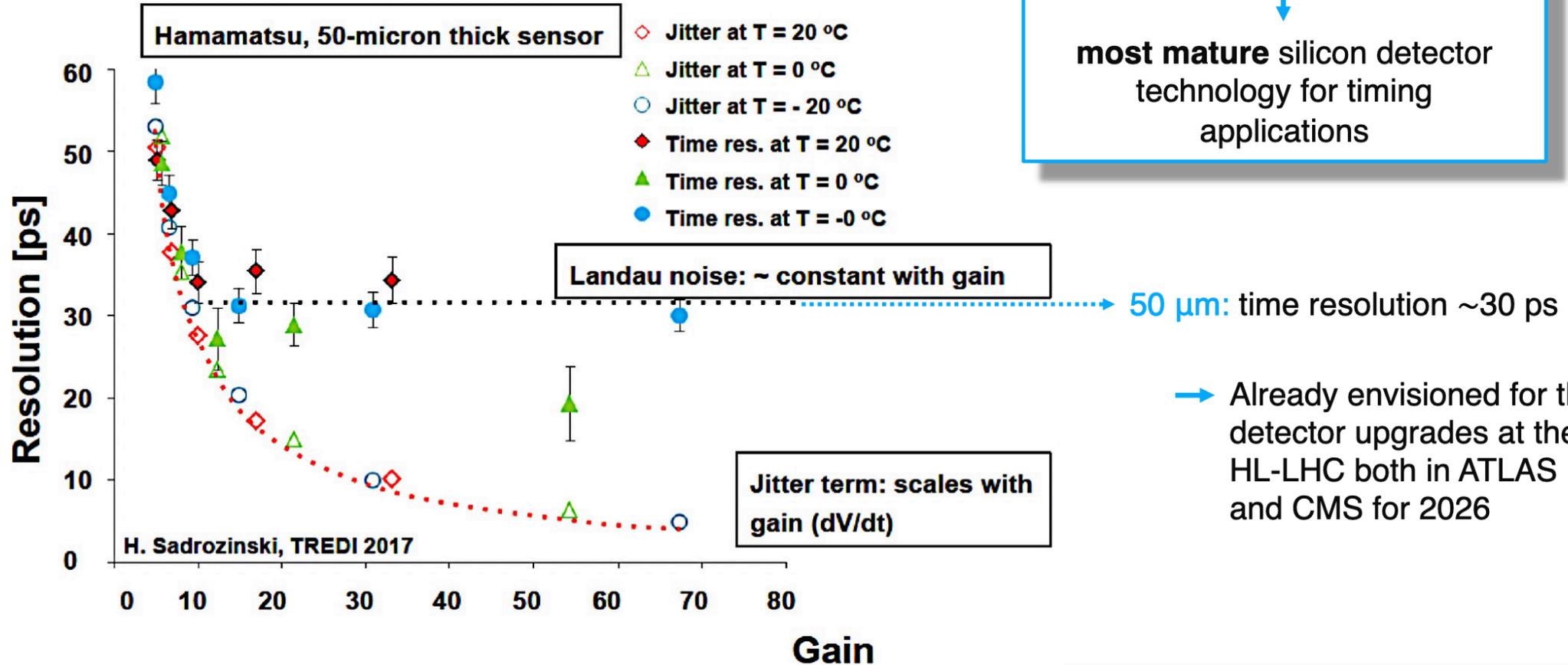
- Design di un layer di guadagno plug-in utilizzando la tecnologia dei MAPS di ARCADIA (110 nm)
- **Fattibilità già discussa con Lfoundry**
- Run di produzione dedicato per ottimizzare la risoluzione temporale (**motivo dello sblocco s.j di 30 keuro**)

Simulazioni TCAD: risoluzione temporale vs. PAD size (pitch) e spessore attivo



ALICE 3 TOF: sensori LGADS

STATE OF THE ART



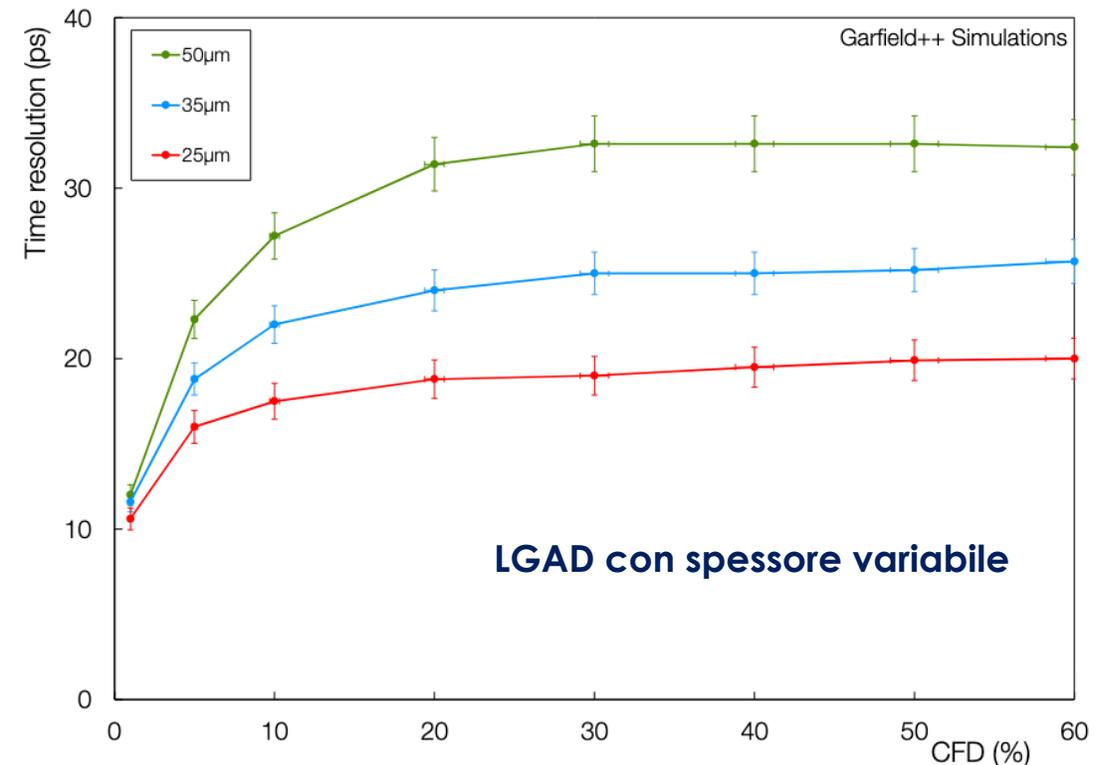
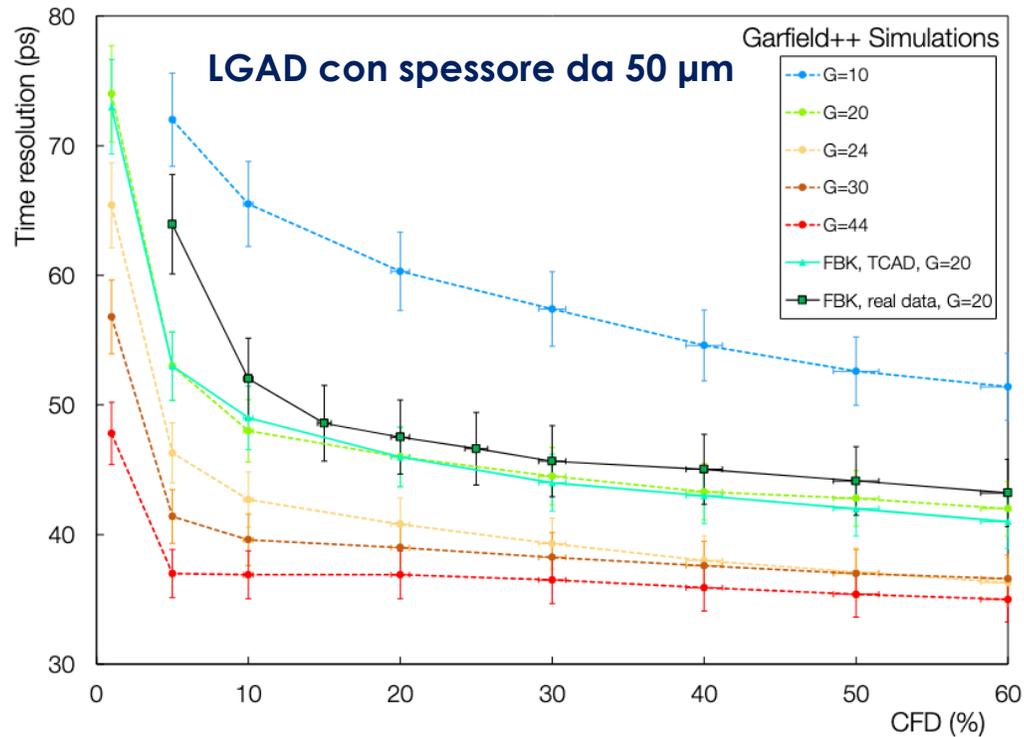
Extensively studied in recent years



most mature silicon detector technology for timing applications

ALICE 3 TOF: simulazione di sensori LGADS

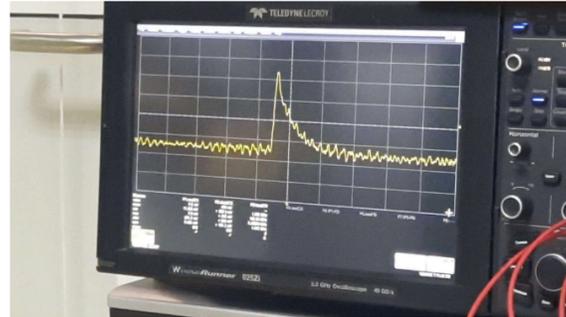
Risultati ottenuti nell'ambito delle attività del TOF Working Group



LGAD con un guadagno di 20 e 25 μm di spessore permetterebbero di raggiungere le prestazioni desiderate per il TOF di ALICE 3 in termini di risoluzione temporale

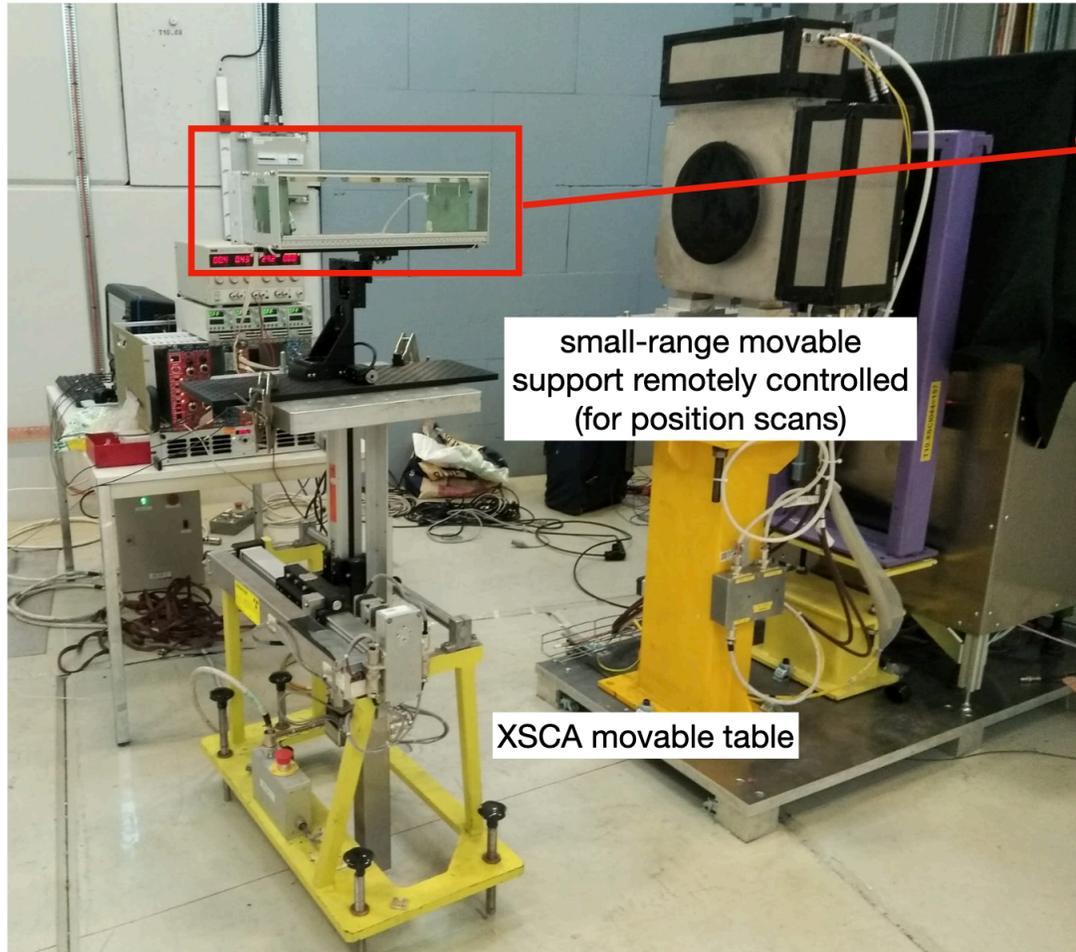
ALICE 3 TOF: caratterizzazione di sensori LGADS

Test beam effettuati dal 5 al 14 Novembre 2021 (5-10 come main user, 11-14 come parasitic user)



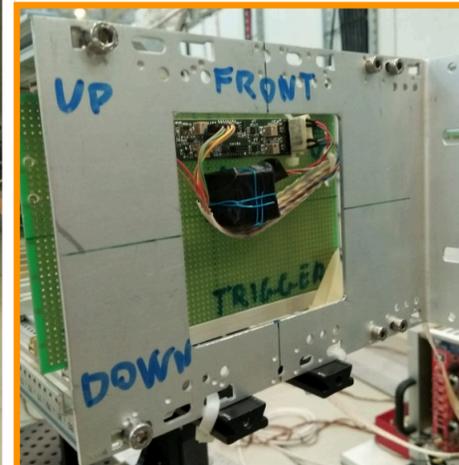
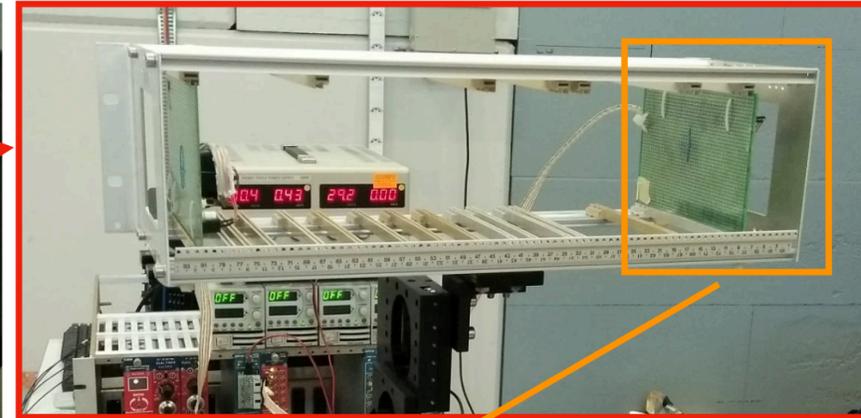
ALICE 3 TOF: caratterizzazione di sensori LGADS

Test beam effettuati dal 5 al 14 Novembre 2021 (5-10 come main user, 11-14 come parasitic user)



small-range movable support remotely controlled (for position scans)

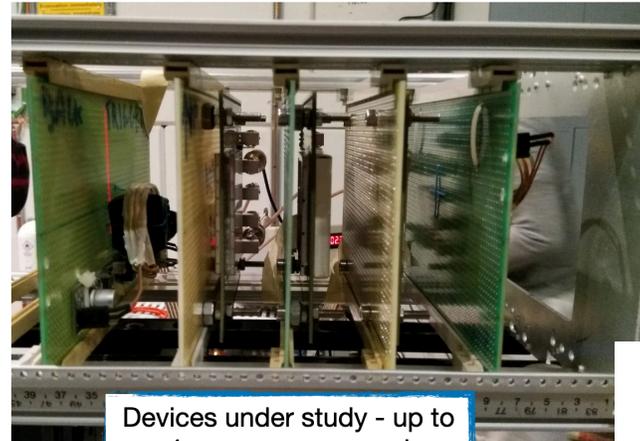
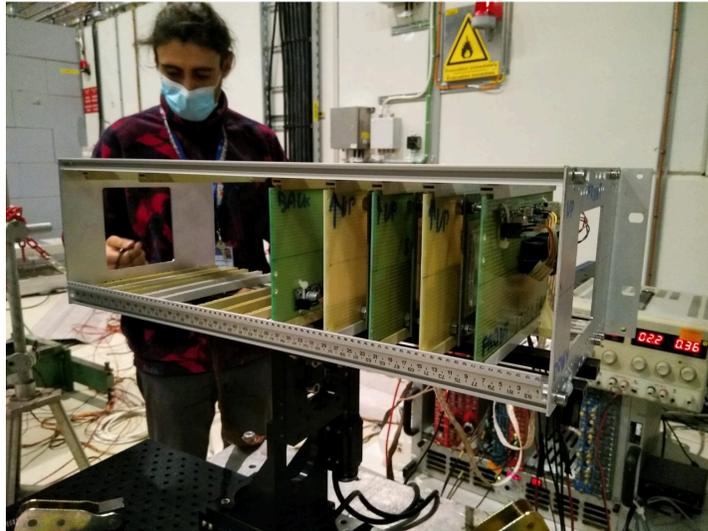
XSCA movable table



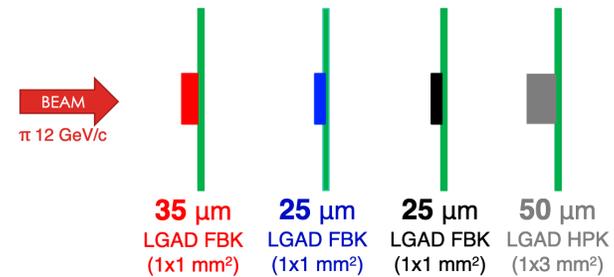
telescope with 4 plastic scintillators BC-420 (2 upstream and 2 downstream the DUTs), size of $0.5 \times 0.5 \times 1 \text{ cm}^3$, with one SiPM each for triggering purpose

ALICE 3 TOF: caratterizzazione di sensori LGADS

Test beam effettuati dal 5 al 14 Novembre 2021 (5-10 come main user, 11-14 come parasitic user)



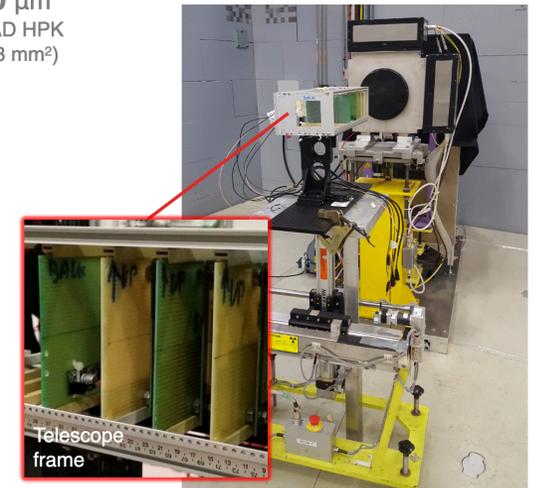
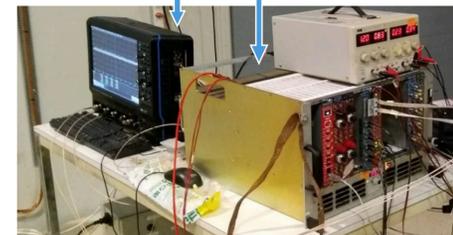
Devices under study - up to 4 sensors measured simultaneously



TEST BEAM SETUP

LeCroy WaveRunner 9404M-MS
Sampling rate: 20 GS/s
Time discretization: 50 ps

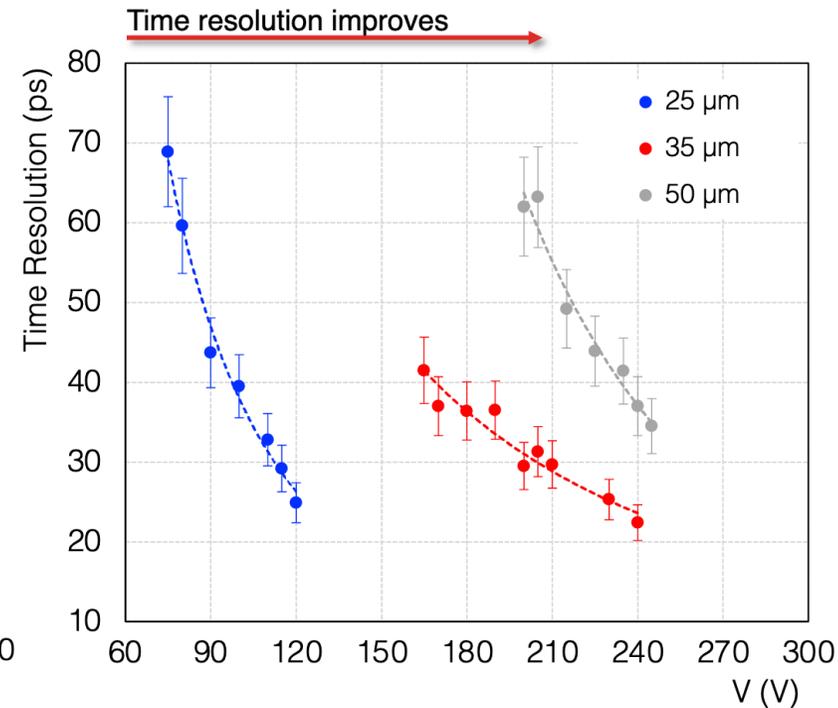
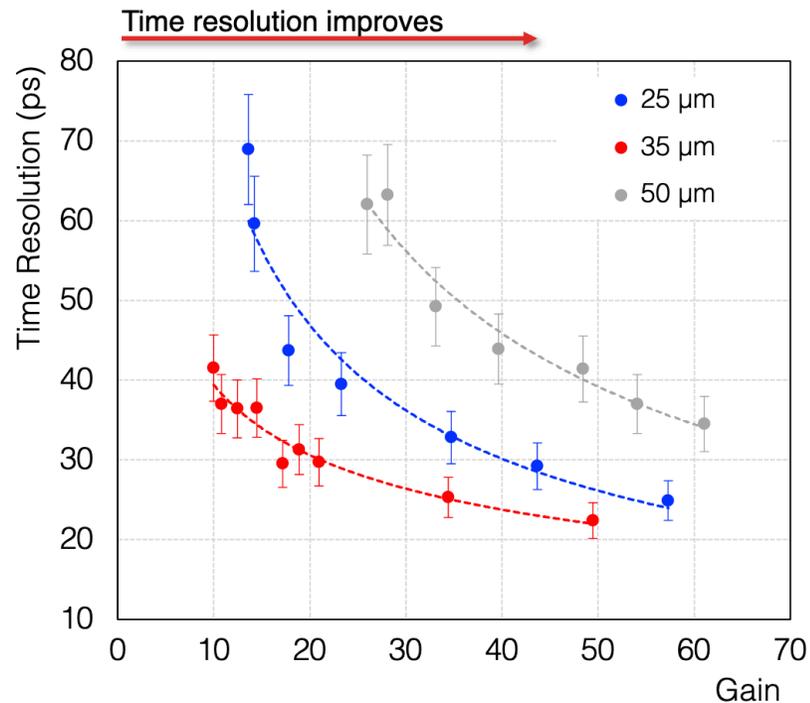
CAEN power supply



Telescope frame

ALICE 3 TOF: caratterizzazione di sensori LGADS

- 50 μm LGAD \rightarrow ~ 34 ps confirms previous results
- Better values for thinner detectors (\searrow Landau term)
- 25 & 35 μm are compatible within the uncertainties ~ 25 ps & 22 ps
 - \rightarrow worse S/N, not optimized wafer production

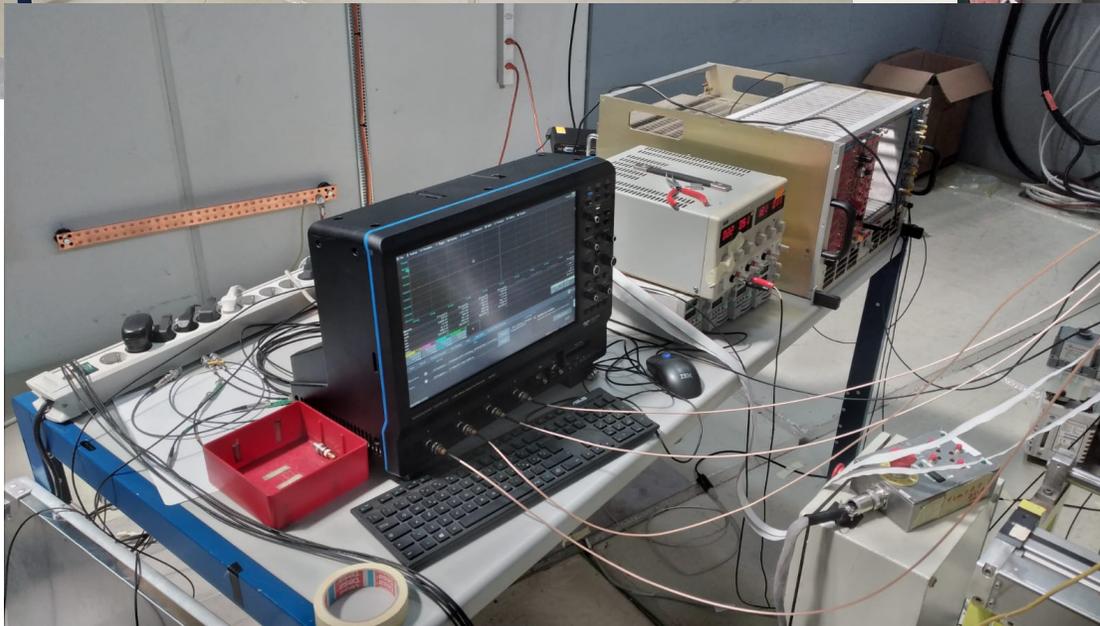
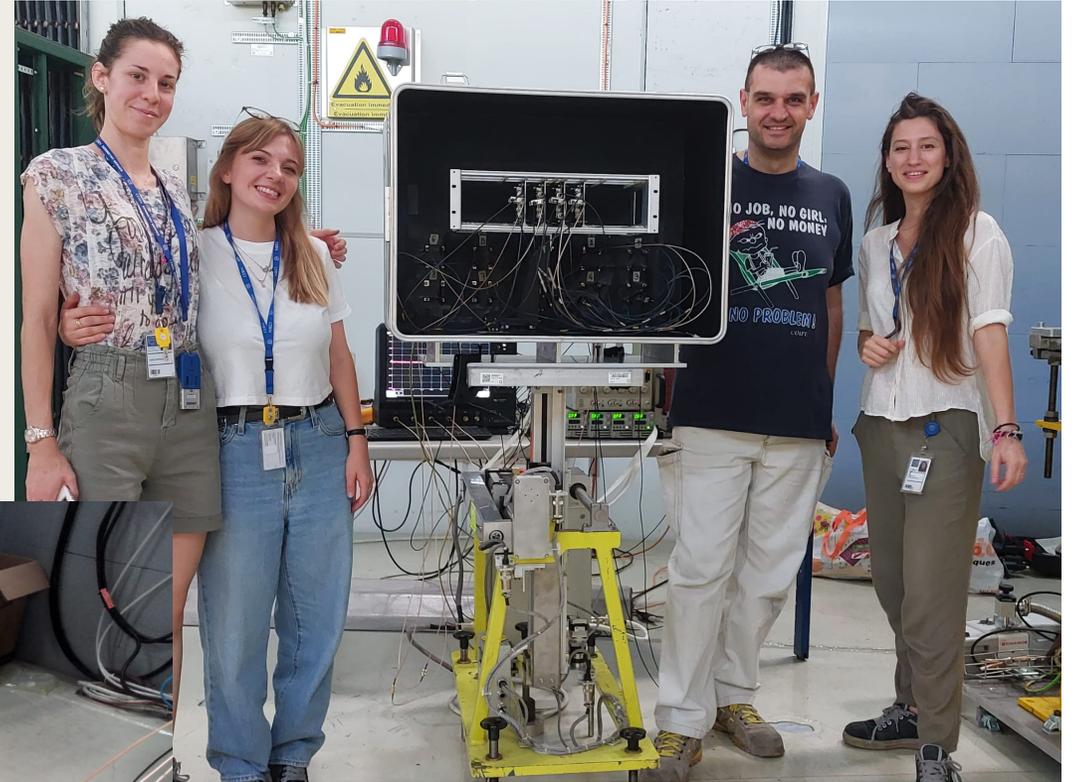


- LGAD di FBK con spessore pari a 25, 35 e 50 μm testati con fascio di pioni a 12 GeV/c al PS del CERN.
- Sensori con spessore pari a 25 e 35 μm testati per la prima volta su fascio
- Sensori disponibili grazie a contatti già esistenti con FBK.
- Nuovi test in questi giorni al CERN PS e altro test beam previsto in novembre 2022.

ALICE 3 TOF: caratterizzazione di sensori



Test beam in questi giorni al CERN PS



ALICE 3 TOF: piano per il 2023

R&D per il 2023 prevede le seguenti attività

- ❖ **Caratterizzazione del primo prototipo di chip** ottimizzato per misure di timing e prodotto nel corso del 2022 nell'engineering run dedicato e parzialmente coperto dallo sblocco s.j (processo LFoundry 110 nm)
- ❖ **Modellazione e validazione del sensore**: attività di simulazione fondamentale per ottimizzare i parametri funzionali (es. tempo ed efficienza di raccolta della carica, resistenza alle radiazioni) del prototipo. Fondamentale l'interazione già in corso con la fonderia per l'ottimizzazione del processo.
- ❖ **Progettazione di fattibilità e readout del sistema**: questa attività ha lo scopo di ottimizzare i requisiti per l'architettura elettronica di very front- end

ALICE 3 TOF: piano per il 2023

R&D per il 2023 prevede le seguenti attività

- ❖ **Caratterizzazione del primo prototipo di chip** ottimizzato per misure di timing e prodotto nel corso del 2022 nell'engineering run dedicato e parzialmente coperto dallo sblocco s.j (processo LFoundry 110 nm)
- ❖ **Modellazione e validazione del sensore:** attività di simulazione fondamentale per ottimizzare i parametri funzionali (es. tempo ed efficienza di raccolta della carica, resistenza alle radiazioni) del prototipo. Fondamentale l'interazione già in corso con la fonderia per l'ottimizzazione del processo.
- ❖ **Progettazione di fattibilità e readout del sistema:** questa attività ha lo scopo di ottimizzare i requisiti per l'architettura elettronica di very front- end
- ❖ Tutte le attività elencate sopra saranno finalizzate alla sottomissione di un nuovo prototipo in **un secondo engineering run per il 2023** (fondamentale il supporto INFN)
- ❖ Parallelamente si proseguirà con la caratterizzazione, sia in laboratorio che con beam test, dei **sensori LGADs (fall back solution presentata nella Lol)** disponibili nelle Sezioni INFN coinvolte nel progetto.

ALICE 3 TOF: piano per il 2023-2025

Un programma ottimale ed organico di R&D per implementare un layer di guadagno nei CMOS dovrebbe prevedere:

- **la necessità di 3 engineering run** per mettere a punto la versione finale del sensore
 - si può stimare un costo complessivo di circa 1.5 milioni di euro (500 k euro/anno per tre anni) per mettere a punto la tecnologia.
 - si assume come prudente l'utilizzo del processo a 110 nm, considerato perfettamente adeguato per raggiungere l'obiettivo di 20 ps di risoluzione temporale
 - Documento preliminare preparato a supporto della richiesta da sottoporre alle GE

Questo programma di R&D permetterebbe all'INFN di mantenere un ruolo di piena competitività rispetto ad altri istituti che partecipano al progetto ALICE 3

ALICE 3 planning



2023 – 2025: selezione delle tecnologie, prototipi su piccolo scala (~25% dei fondi di R&D)

2026 – 2027: prototipi su larga scala (~75% dei fondi di R&D) ⇒ Technical Design Reports

2028 – 2030: costruzione e test

2031 – 2032: "contingency" per assorbire gli eventuali ritardi

2033 – 2034: installazione e commissioning

2035 – 2042: fisica