

ALICE 3 TOF: ATTIVITÀ IN CORSO E PROSPETTIVE FUTURE

S. Bufalino

(grazie al contributo di molt* collegh*)

ALICE 3 TOF: contributo italiano e organizzazione attività di R&D

- **Coordinazione italiana** del Work Package dedicato al R&D del TOF: S. Bufalino (Torino), M. Colocci (Bologna), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** **Bologna, Torino, Trieste, Trento**

Focus dell'attività di R&D del 2024-2025 finalizzata al test in laboratorio e con fasci di particelle delle tecnologie proposte nella Lol:

CMOS (baseline), LGADs (fallback solution) and SPADs (synergy with RICH R&D)

ALICE 3 TOF: contributo italiano e organizzazione attività di R&D

- **Coordinazione italiana** del Work Package dedicato al R&D del TOF: S. Bufalino (Torino), M. Colocci (Bologna), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte: Bologna, Torino, Trieste, Trento**

Focus dell'attività di R&D del 2024-2025 finalizzata al test in laboratorio e con fasci di particelle delle tecnologie proposte nella Lol:

CMOS (baseline), **LGADs (fallback solution)** and **SPADs (synergy with RICH R&D)**

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD, Garfield++ e Allpix² per il design di un sensore monolitico con risoluzione temporale di 20 ps e confronto con dati sperimentali
- Nuova tecnologia proposta nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno**

ALICE 3 TOF: contributo italiano e organizzazione attività di R&D

- **Coordinazione italiana** del Work Package dedicato al R&D del TOF: S. Bufalino (Torino), M. Colocci (Bologna), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte: Bologna, Torino, Trieste, Trento**

Focus dell'attività di R&D del 2024-2025 finalizzata al test in laboratorio e con fasci di particelle delle tecnologie proposte nella Lol:

CMOS (baseline), **LGADs (fallback solution)** and **SPADs (synergy with RICH R&D)**

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD, Garfield++ e Allpix² per il design di un sensore monolitico con risoluzione temporale di 20 ps e confronto con dati sperimentali
- Nuova tecnologia proposta nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno**

Caratterizzazione di sensori

- Test in laboratorio di sensori disponibili nelle sedi coinvolte
- Test beam per caratterizzazione dei sensori con MIPs al CERN PS nel 2023 e l'ultimo si è concluso una settimana fa

ALICE 3 TOF: contributo italiano e organizzazione attività di R&D

- **Coordinazione italiana** del Work Package dedicato al R&D del TOF: S. Bufalino (Torino), M. Colocci (Bologna), A. Rivetti (Torino)
- **sezioni INFN attualmente coinvolte:** **Bologna, Torino, Trieste, Trento**

Focus dell'attività di R&D del 2024-2025 finalizzata al test in laboratorio e con fasci di particelle delle tecnologie proposte nella Lol:

CMOS (baseline), **LGADs (fallback solution)** and **SPADs (synergy with RICH R&D)**

Simulazione di sensori

- Simulazioni TCAD, Garfield++ e Allpix² per il design di un sensore monolitico con risoluzione temporale di 20 ps e confronto con dati sperimentali
- Nuova tecnologia proposta nella Lol: **CMOS con aggiunta di guadagno**

Caratterizzazione di sensori

- Test in laboratorio di sensori disponibili nelle sedi coinvolte
- Test beam per caratterizzazione dei sensori con MIPs al CERN PS nel 2023 e l'ultimo si è concluso una settimana fa

Micro-elettronica

- Supporto per studiare l'interfaccia sensore-elettronica e nell'implementazione delle strutture di test

ALICE 3 TOF - R&D activities planned for 2024

L'attività di R&D per il 2024 prevede:

Piano presentato a luglio 2023

- **attività di caratterizzazione in laboratorio e analisi dei risultati del test beam** appena concluso e di quelli che otterremo nel test beam previsto in ottobre 2023
- **Sensori da testare:**
 - **stretta collaborazione tra i gruppi coinvolti** per organizzazione dei test beam in modo da poter testare più sensori possibili
 - test di MADpix su telescopio a ottobre e design test board dedicata
- **Modellazione e validazione del sensore:** l'attività di simulazione TCAD e Monte Carlo per CMOS con guadagno procederà in parallelo, con l'obiettivo di sviluppare sensori più sottili e ottimizzare le performance anche sulla base dei risultati dei test beam
- **Simulazioni TCAD dettagliate in corso**, con il supporto di LFoundry, e misure dello split high-dose. **Possibile un run di fabbricazione "short-loop"** usando le maschere di litografia del ER3 di ARCADIA per ottimizzazione del processo di impiantazione.



Attività di caratterizzazione in laboratorio e analisi dei risultati del test beam

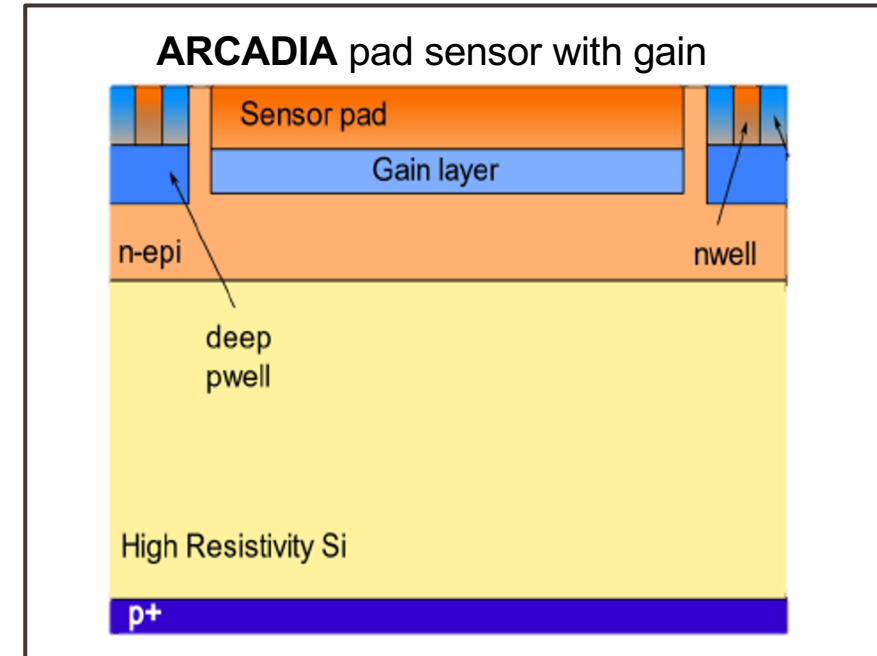
ARCADIA MAPS with gain add-on option

MADPIX *M*onolithic CMOS *A*valanche *D*etector *P*IXelated Prototype

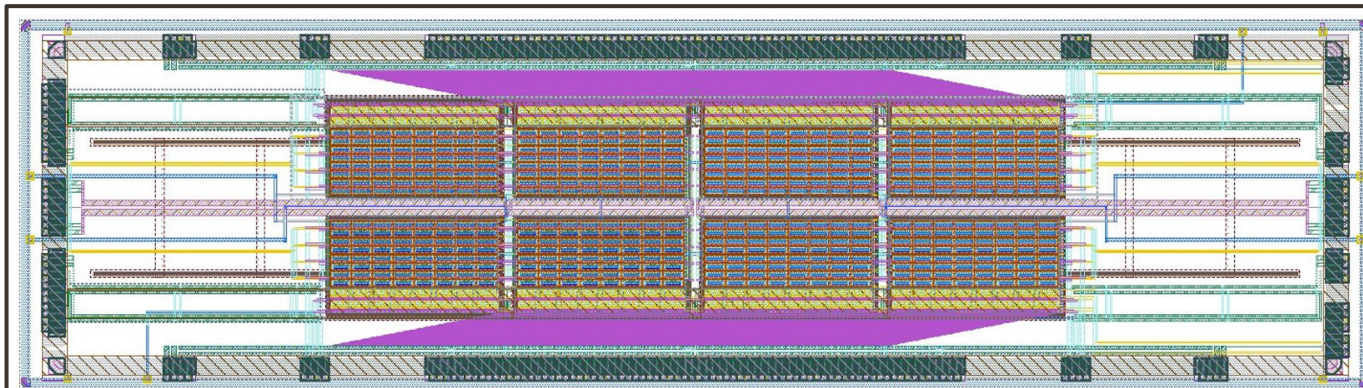
First prototype with integrated electronics and gain layer

Active thickness: 48 μm

- Backside HV: allow full depletion \rightarrow -25 V to -40 V
 - Topside HV: manage the gain \rightarrow 30 V to 50 V
- » 8 matrices of 64 pixels each » 64 x 2 analogue outputs
- » 4 flavours » Pixels of 250 μm x 100 μm



LF foundry in 110 nm commercial CMOS Process

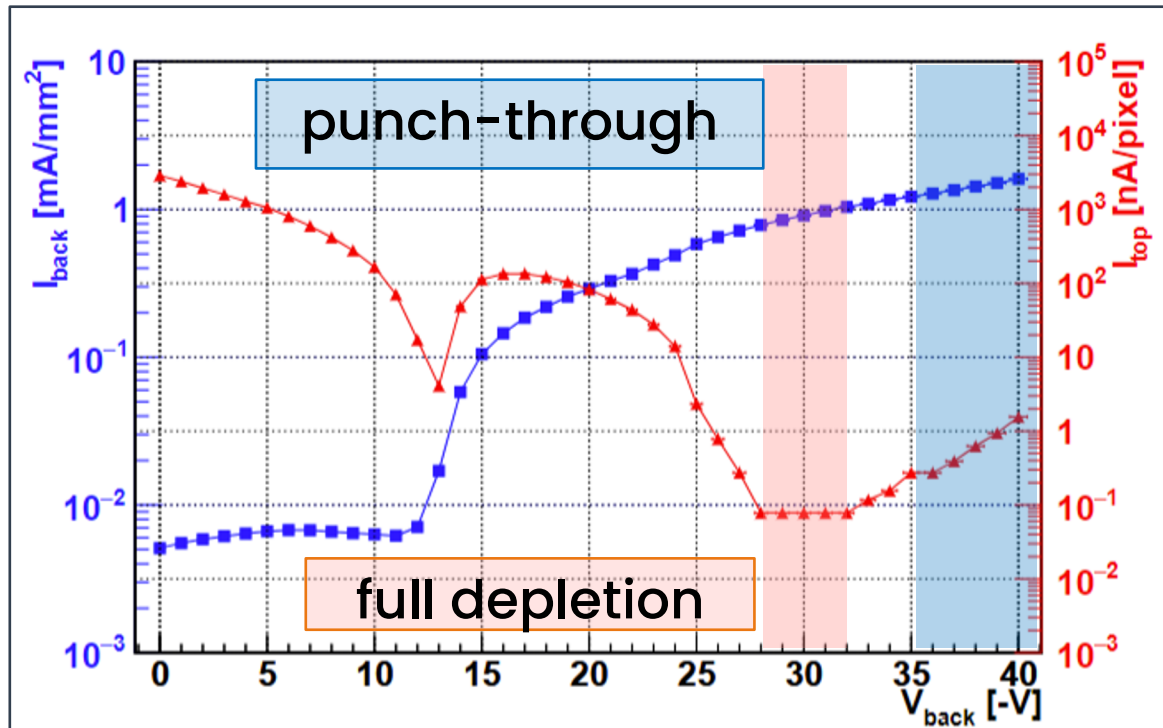


Symmetrical

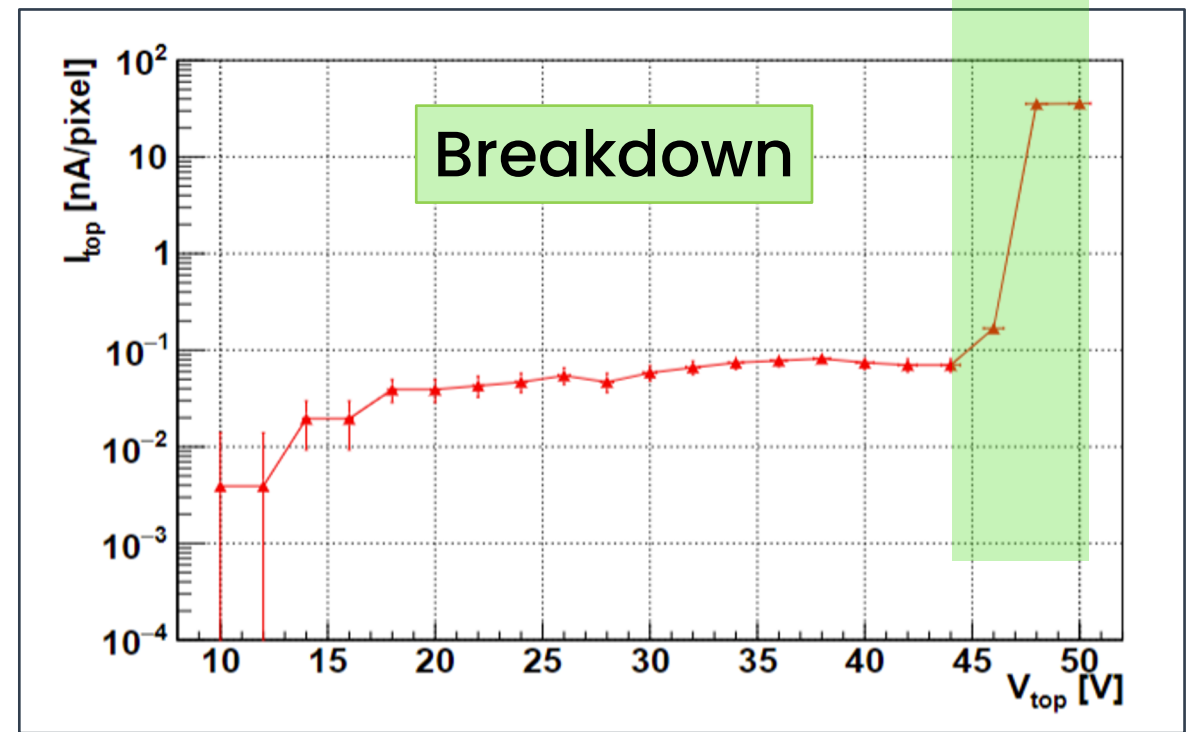
MAPS with gain: characterization in laboratory

I(V) scan to study the sensor behavior

- Full depletion at $V_{\text{back}} -28\text{V}$
- Punch through for HV back $> 35\text{V}$



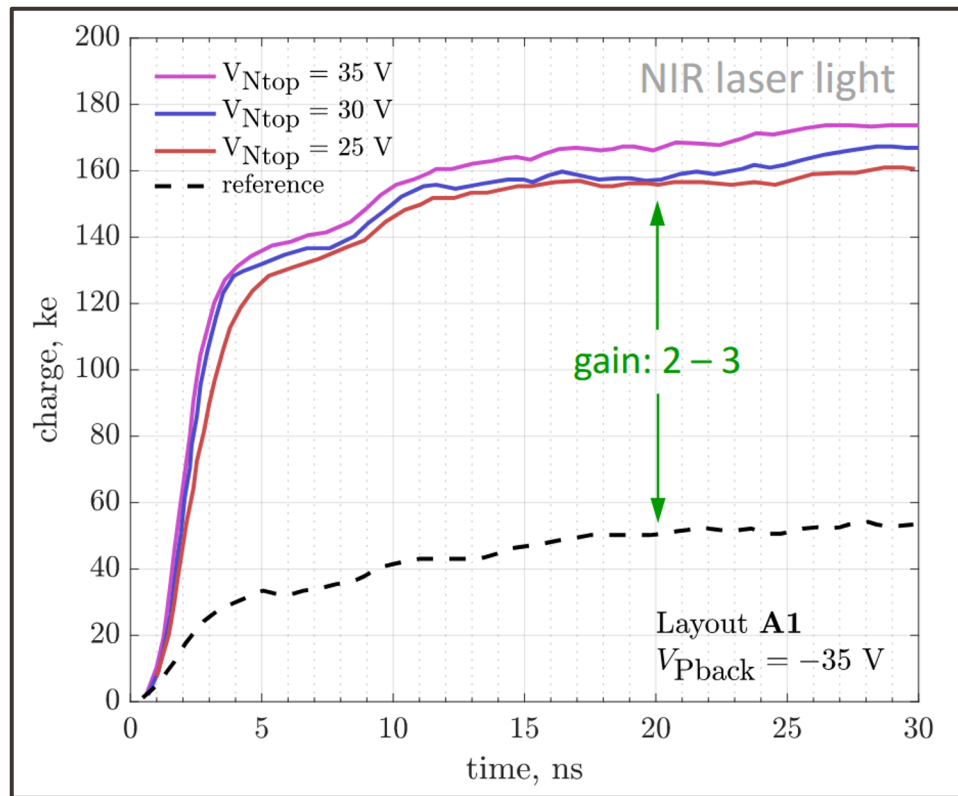
- Breakdown for HV top $> 45\text{V}$



MAPS with gain: laser measurement

Optical characterization at UNITN (Trento)

Integral of the charge \Rightarrow Gain ≈ 2.5



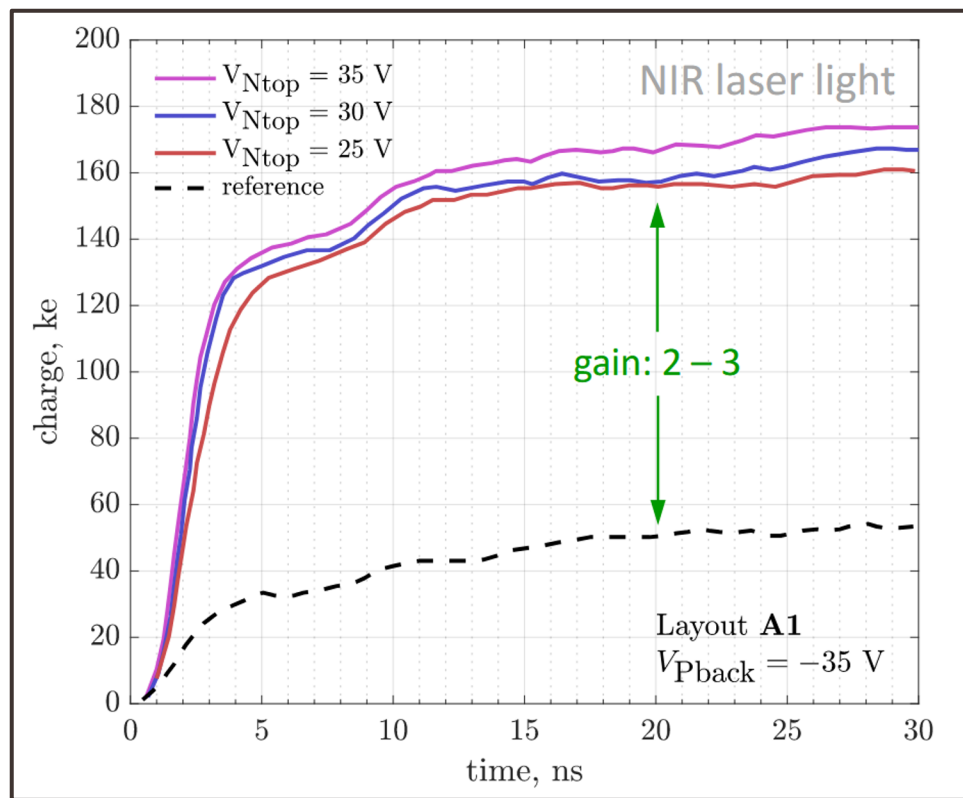
Gain lower with respect to the design as reported last year



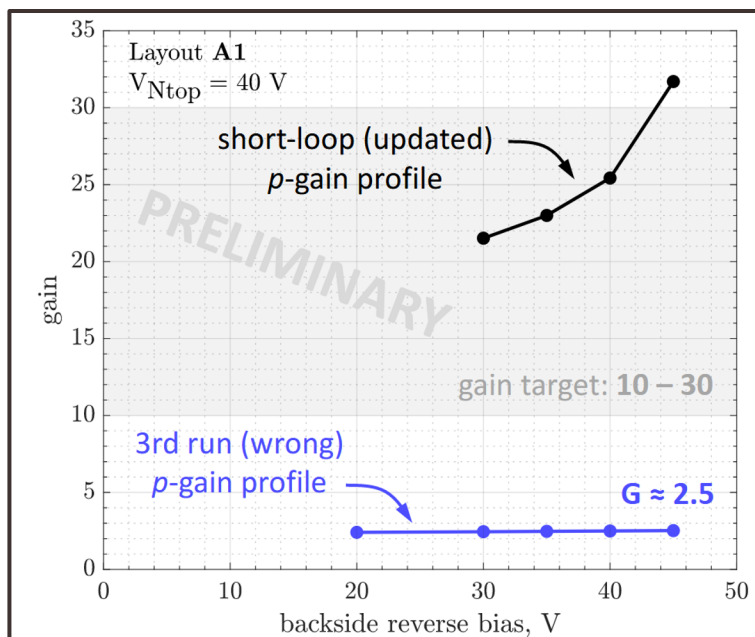
MAPS with gain: laser measurement

Optical characterization at UNITN (Trento)

Integral of the charge \Rightarrow Gain ≈ 2.5



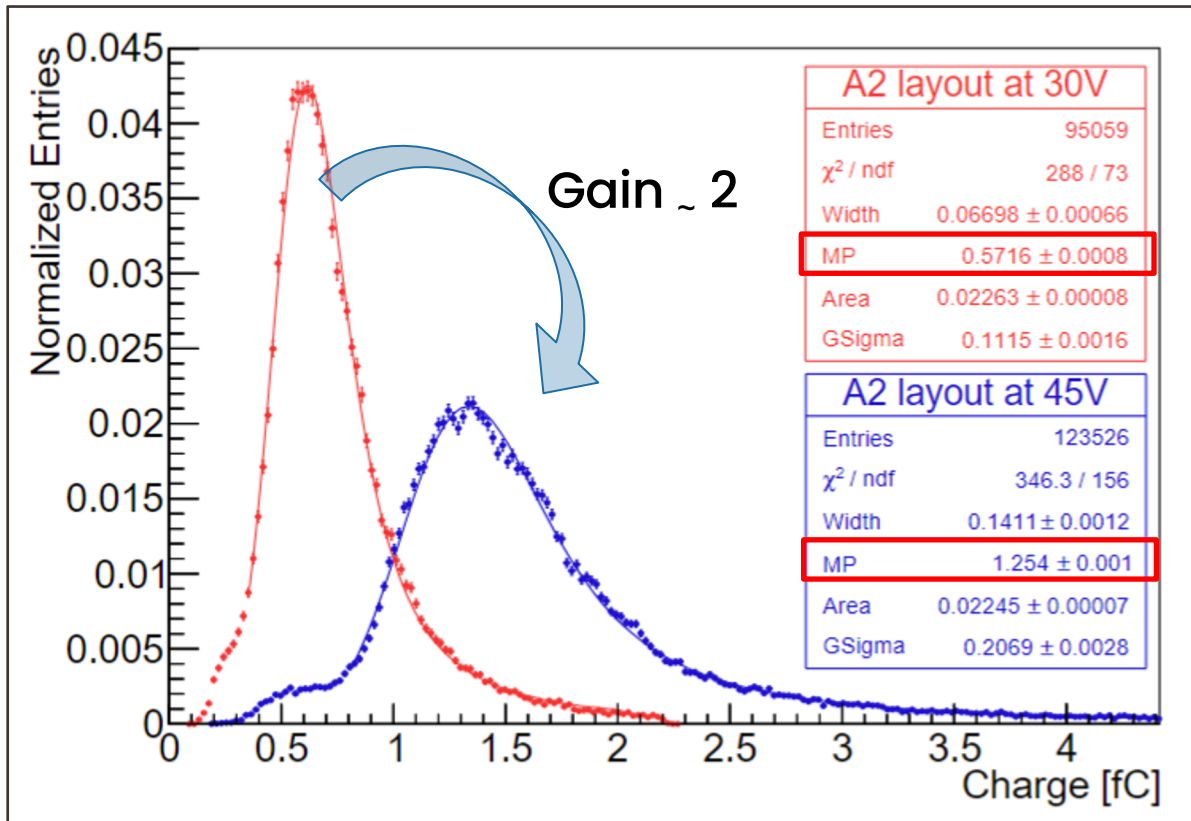
Investigation of the p-gain profile with TCAD



Gain lower with respect to the design as reported last year

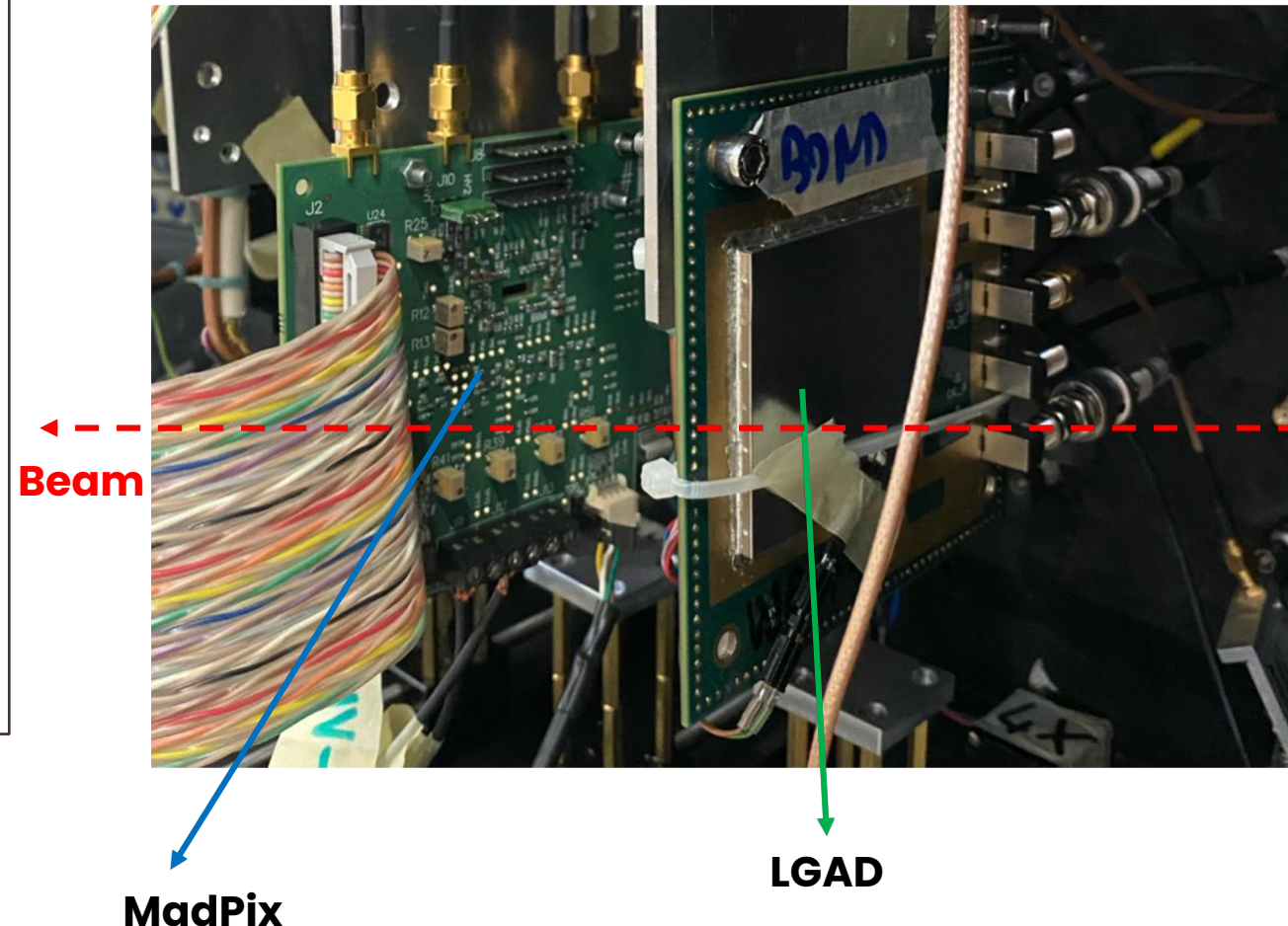
MAPS with gain: measurement with beam

Collected Charge Distribution



Increasing the top voltage, the Most Probable Value (MPV) for a MIP raises

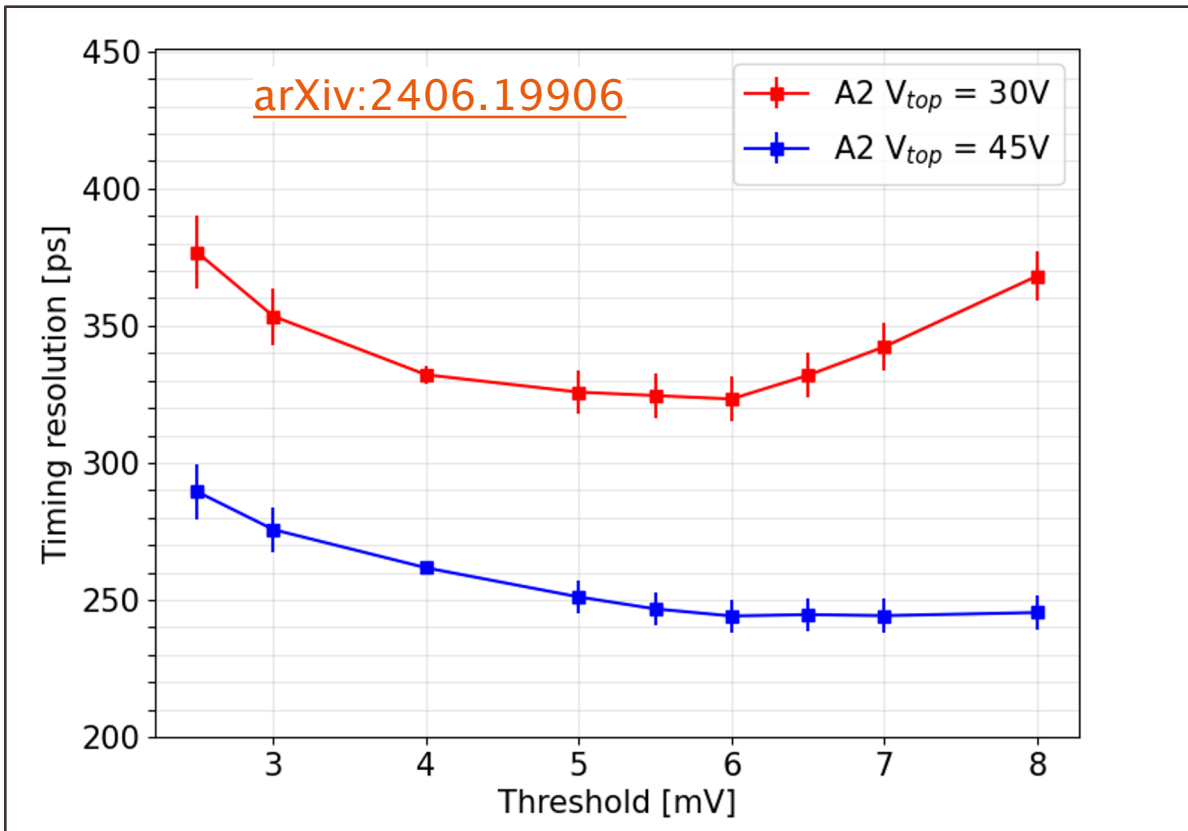
Test on October '23 @CERN PS



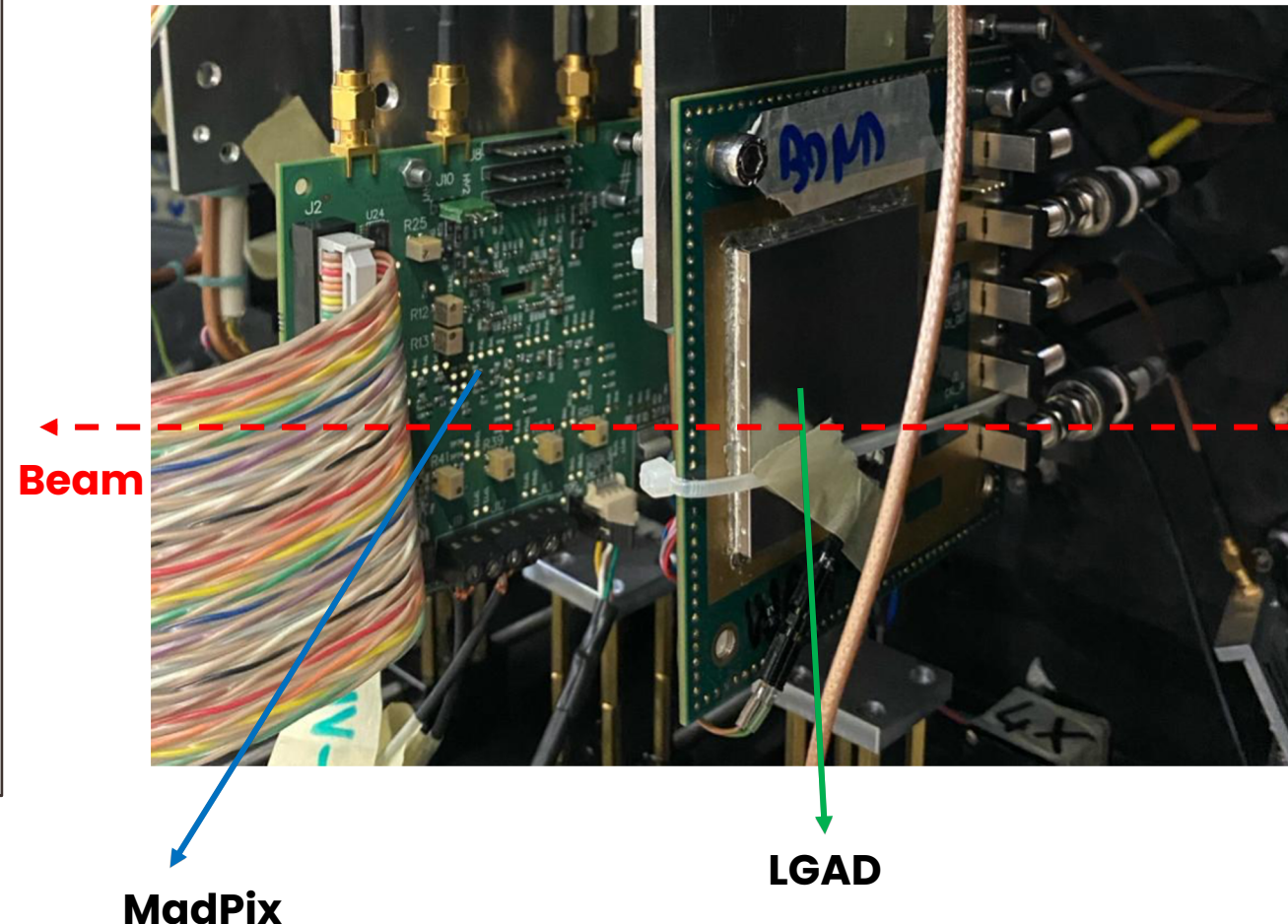
MAPS with gain: measurement with beam

First results on monolithic CMOS
detector with internal gain

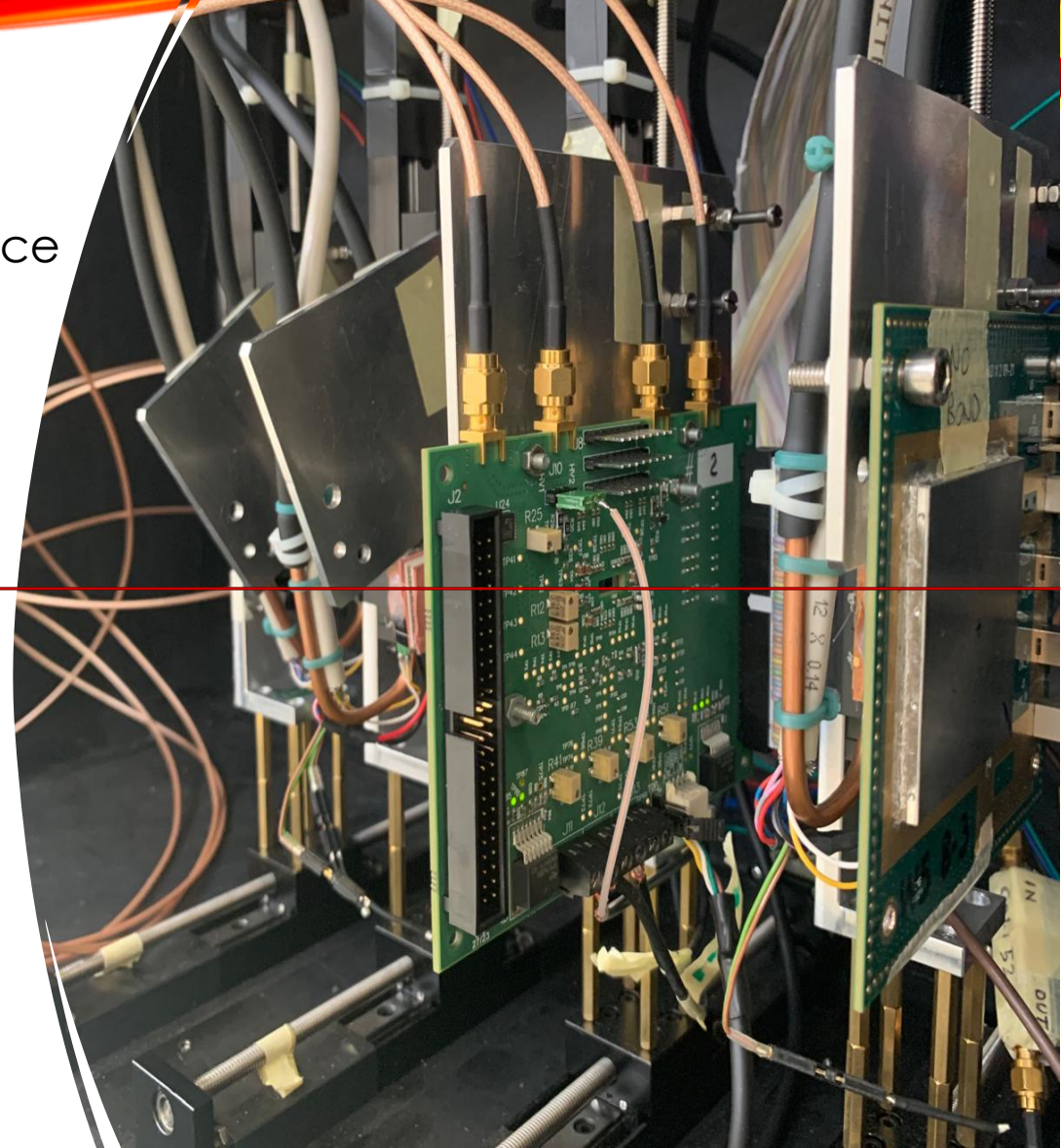
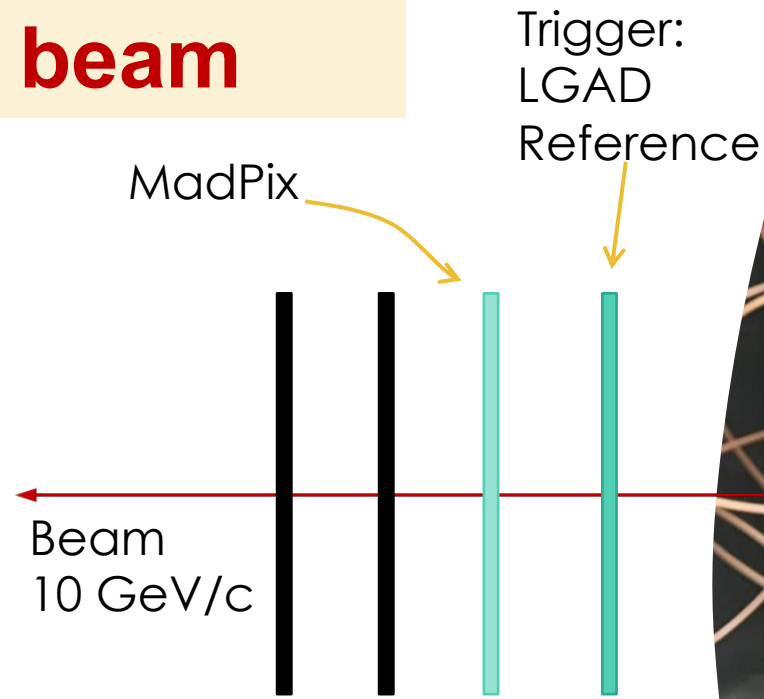
Test on October '23 @CERN PS



ACCEPTED FOR PUBLICATION ON JINST



MAPS with gain: measurement with beam



test beam @ CERN - July 2024

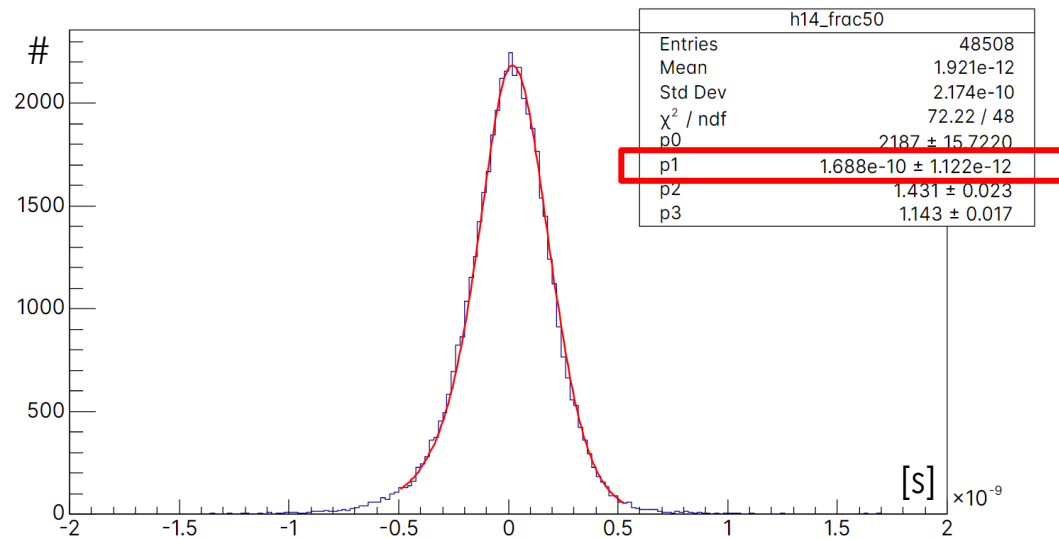
- 2 Test boards (TB2 and TB3)
- 2 Flavors (A1 and A2)
- 4 Pixels (J3, J4, J5, J6)

LGAD 1mm x 1mm
FBK W5, 10-3
Thickness: 25 μm

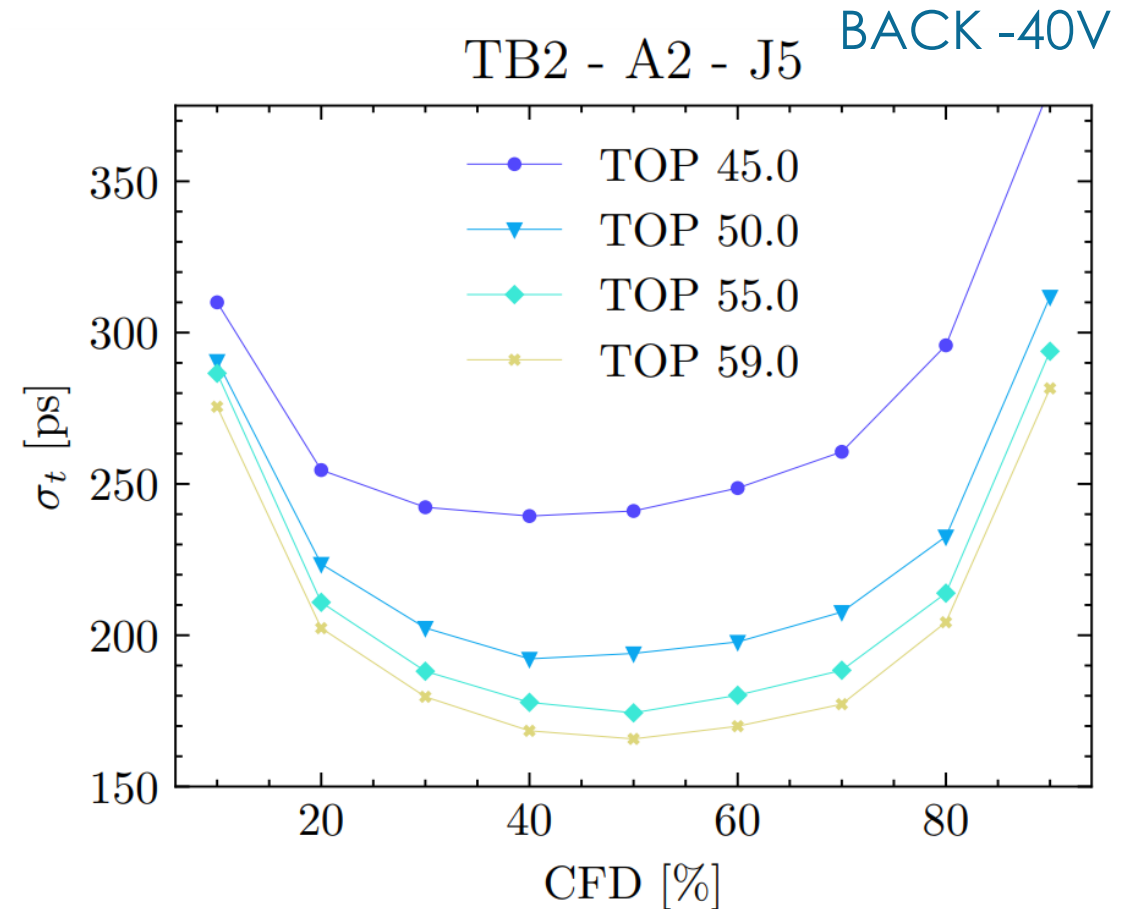
MAPS with gain: timing resolution

test beam @ CERN - July 2024

- Time resolution = standard deviation of the time difference between the reference time of the LGAD and CMOS trigger time
- **Reference time**: LGAD time @ 50% of the amplitude of the signal ($\sigma_t \approx 30$ ps)
- **CMOS trigger time**: crossing time of a fixed fraction of the CMOS amplitude
- Scan of the collection electrode voltage



Gaussian fit with asymmetric tails



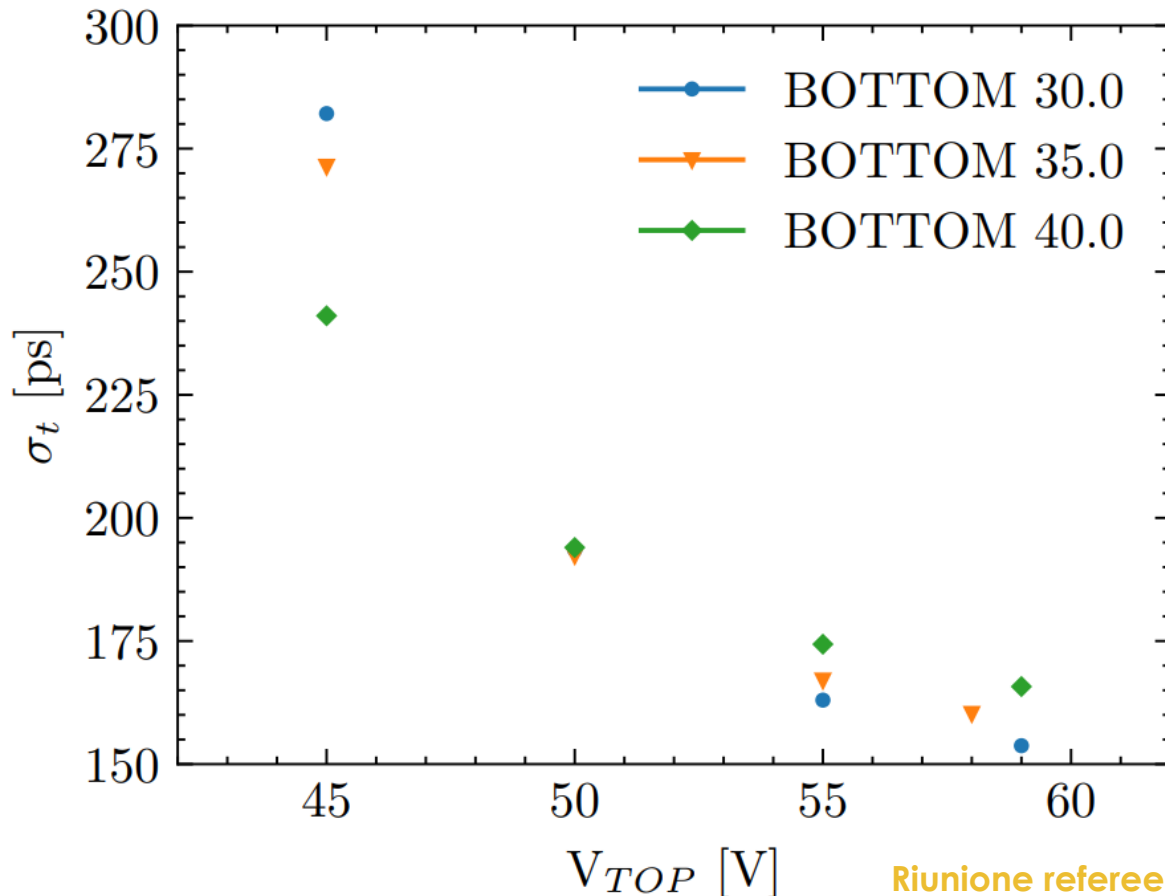
MAPS with gain: timing resolution

test beam @ CERN - July 2024

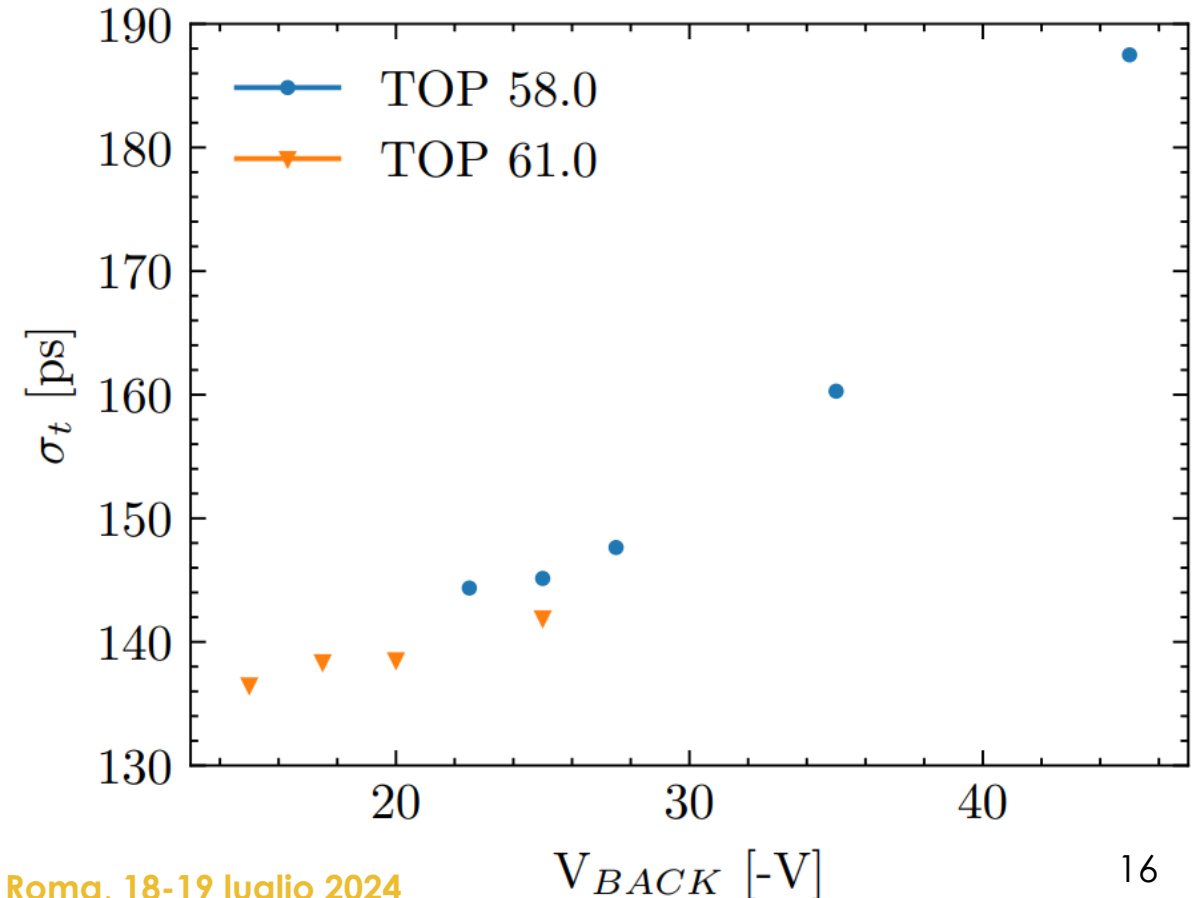
Higher V_{top} \rightarrow Better time resolution

Lower V_{back} \rightarrow Better time resolution

TB2 - A2 - J5 - CFD: 50.0%

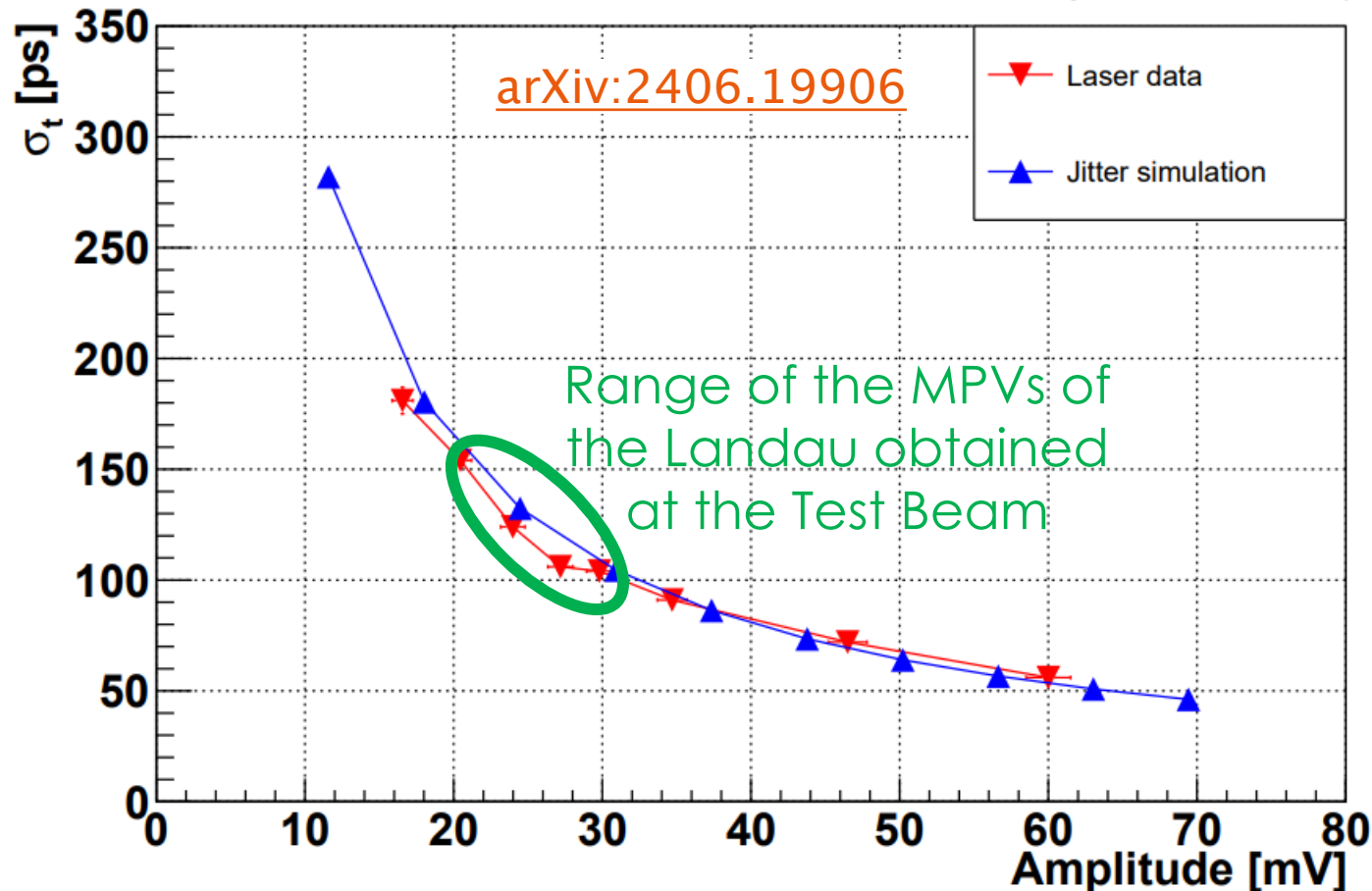


TB2 - A2 - J5 - CFD: 50.0%



MAPS with gain: electronic jitter contribution

RMS of the time difference between laser trigger out (TTL) and analogue output of MadPix (@ 50% signal amplitude)



- At present the time resolution is limited by the jitter component
- Increasing the gain, the jitter will decrease

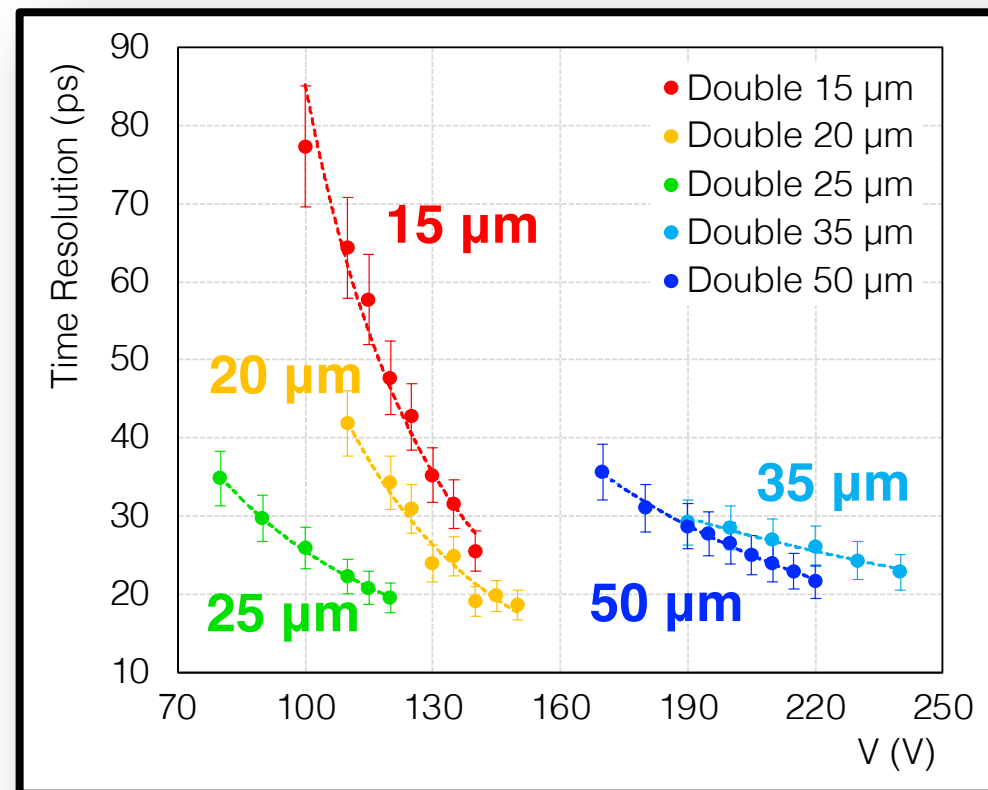
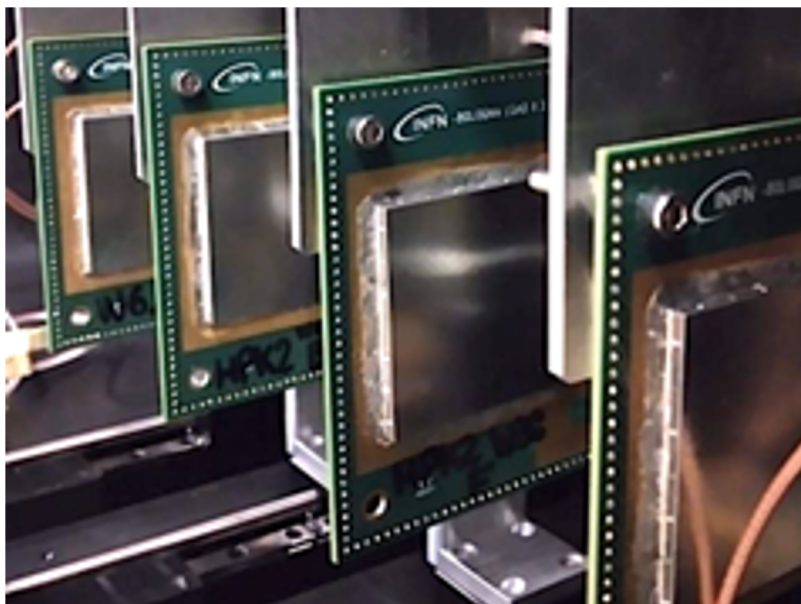


MPV expected from the new short loop run:
> 60 mV → jitter < 60ps

Sensor characterization: LGAD

Intense beam-test campaigns at CERN-PS demonstrated the possibility of achieving a time resolution of 20 ps with thin LGAD design

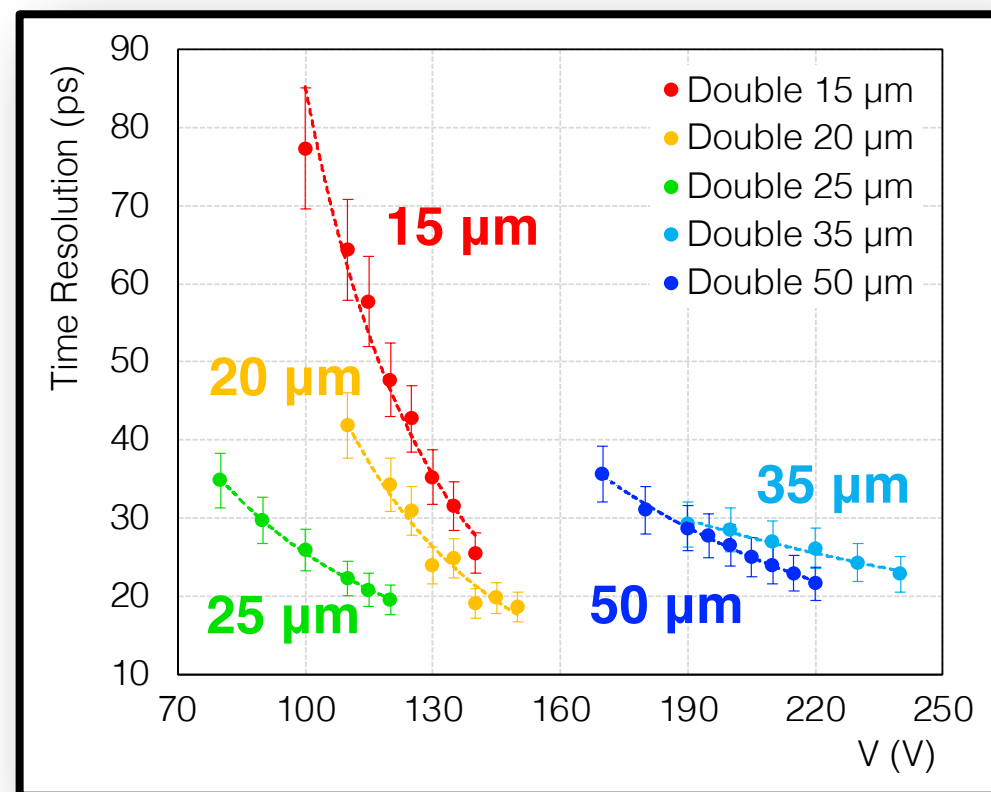
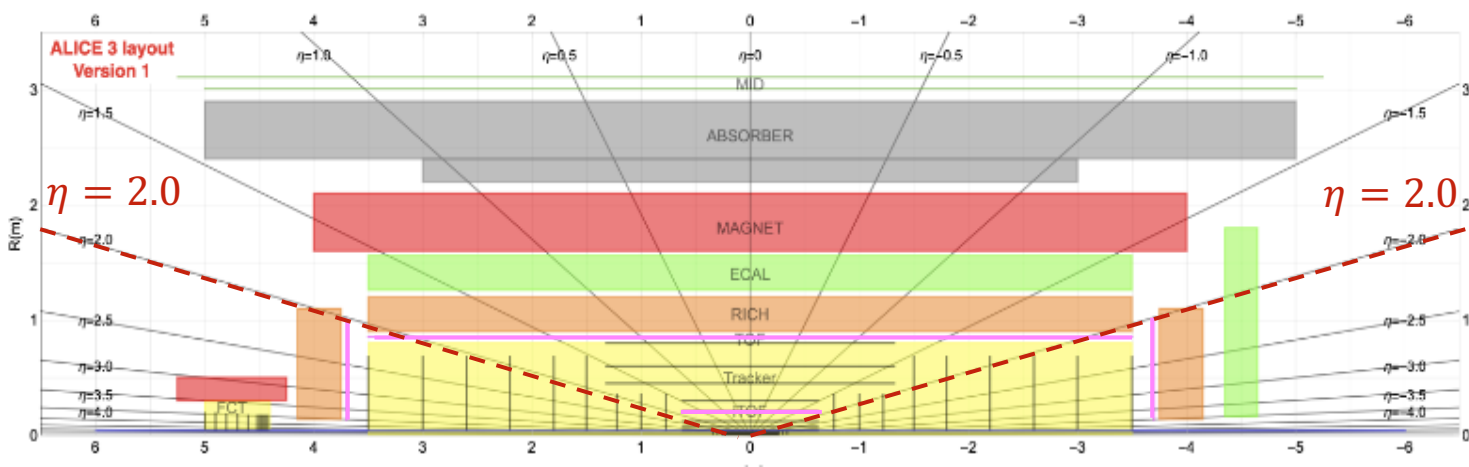
- 25 and 35 μm thickness tested already in <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03619-1> (Jan 23)
- 20, 15 μm thickness tested for the first time in July and Oct 2023



Sensor characterization: LGAD

Intense beam-test campaigns at CERN-PS demonstrated the possibility of achieving a time resolution of 20 ps with thin LGAD design

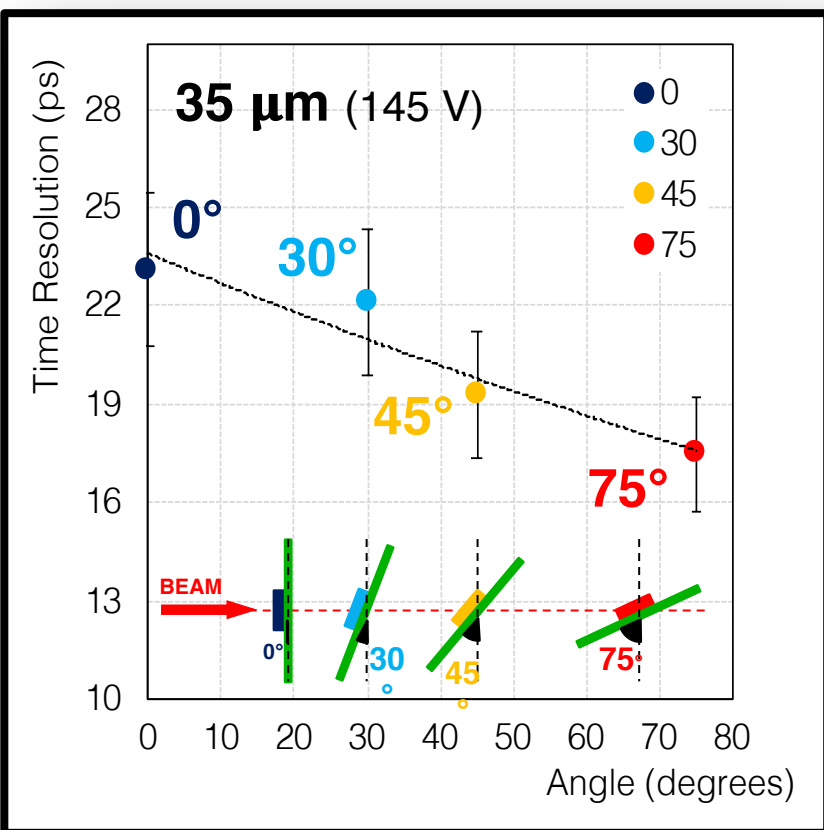
LGAD inclined with respect to the beam direction to probe the sensor response at the edges of the outer barrel ($\eta \simeq 2$)



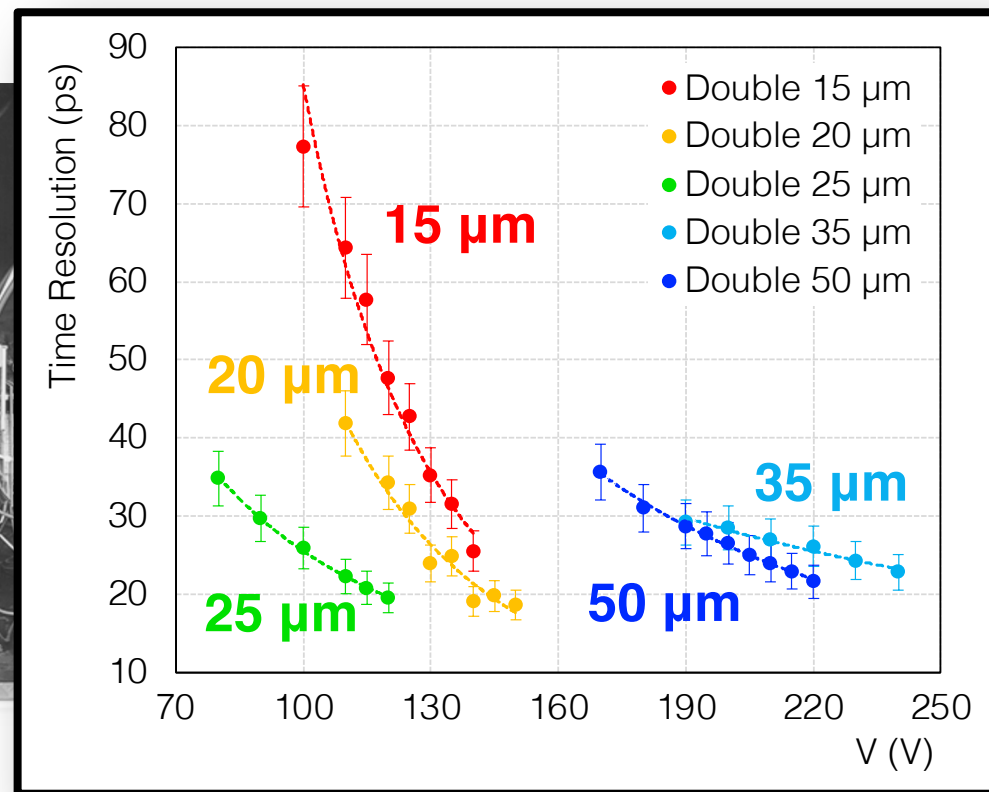
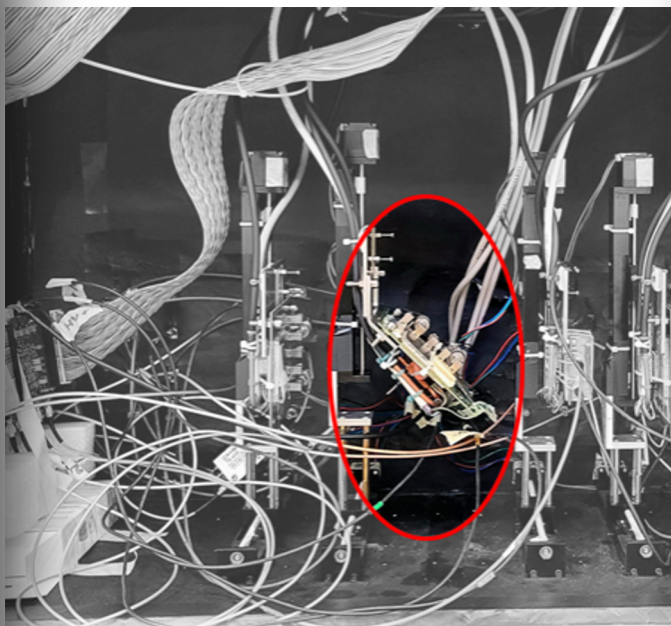
Sensor characterization: LGAD

Intense beam-test campaigns at CERN-PS demonstrated the possibility of achieving a time resolution of 20 ps with thin LGAD design

LGAD inclined with respect to the beam direction to probe the sensor response at the edges of the outer barrel ($\eta \approx 2$)

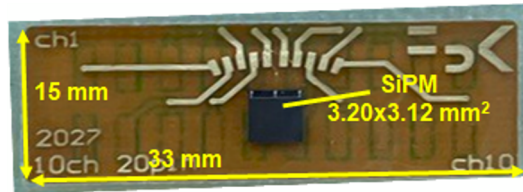


CERN PS - October 2023

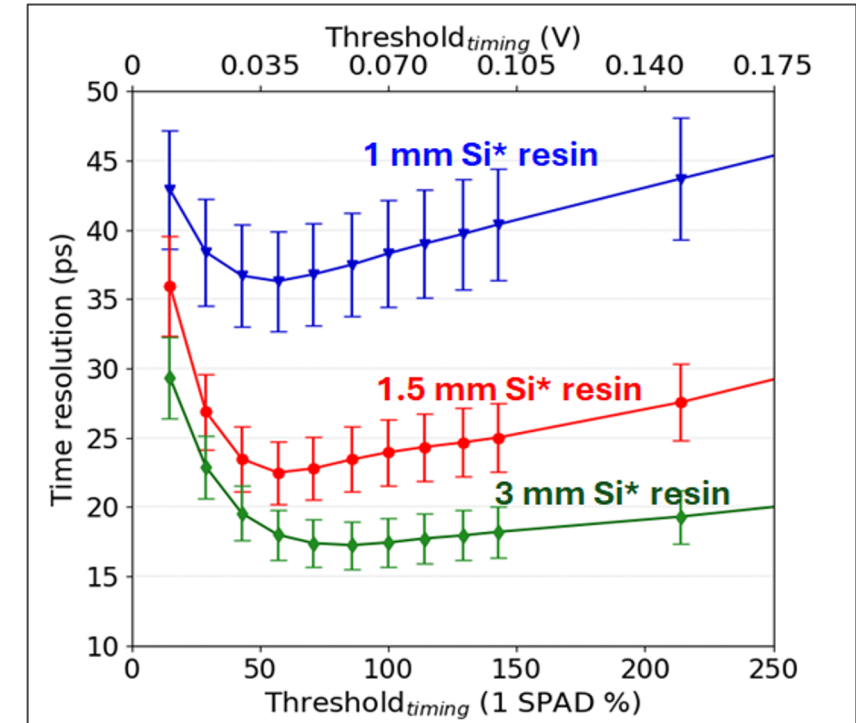


Sensor characterization: SiPM

- **Larger area SiPMs** ($3.2 \times 3.12 \text{ mm}^2$) – enough to collect all produced Cherenkov photons – **tested in October 2023**

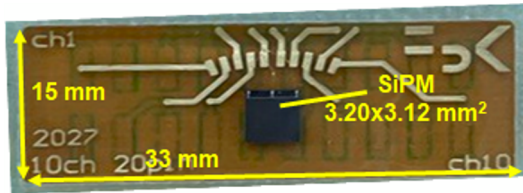


NUV-HD SiPMs produced by FBK
40 μm pixel pitch, 83% FF
(6200 SPADs in $3.2 \times 3.12 \text{ mm}^2$)



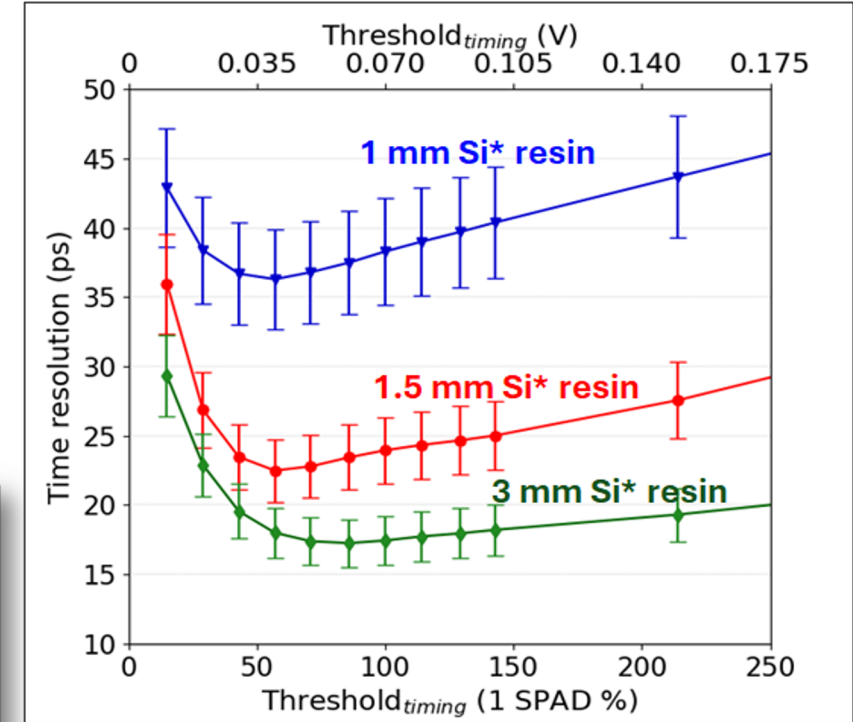
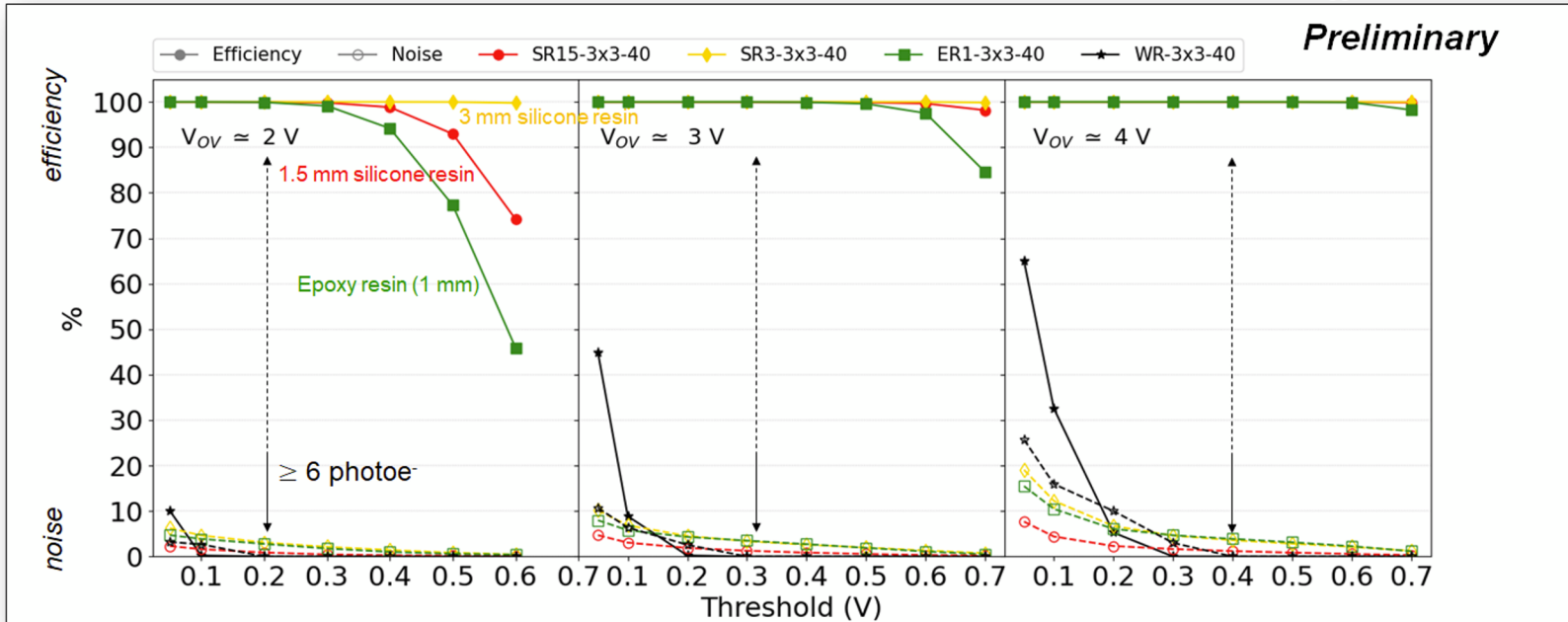
Sensor characterization: SiPM

- **Larger area SiPMs** ($3.2 \times 3.12 \text{ mm}^2$) – enough to collect all produced Cherenkov photons – **tested in October 2023**



NUV-HD SiPMs produced by FBK
 40 μm pixel pitch, 83% FF
 (6200 SPADs in $3.2 \times 3.12 \text{ mm}^2$)

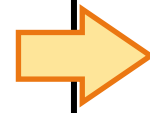
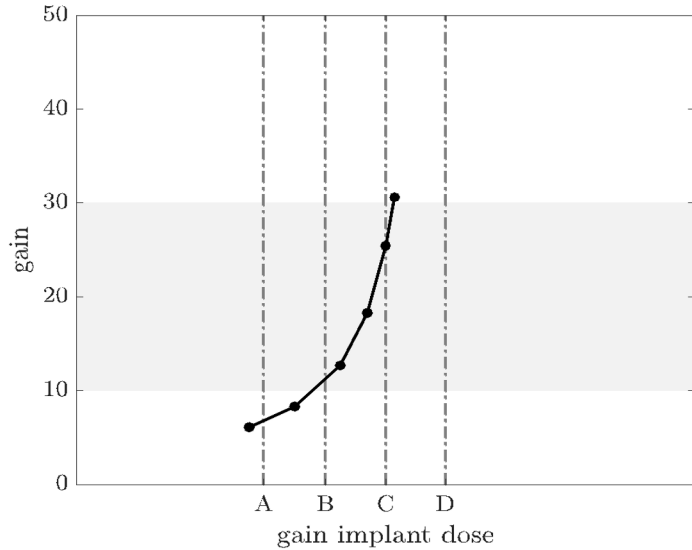
- **Efficiency close to 100% at 6 pe** → sensor can be operated at large n_{pe} threshold i.e. above DCR for a timing detector



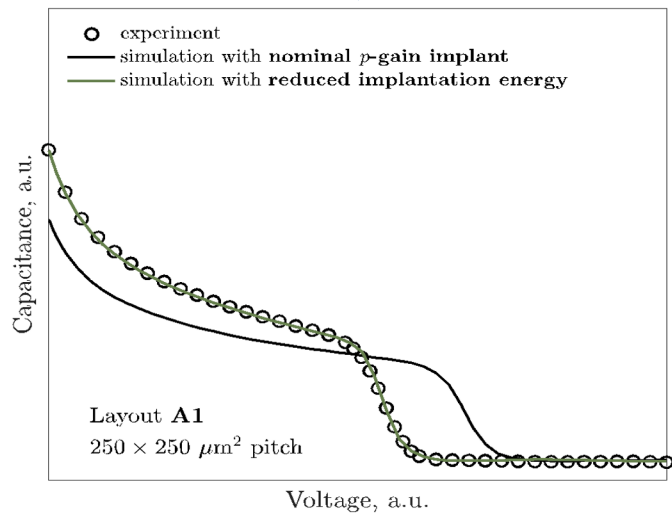
SiPMs at room temp ($20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$)
 → cooling at lower T to be taken into account for further developments

Attività di simulazione per modellazione e validazione del sensore

Run 3



TCAD simulation of the gain vs implant dose



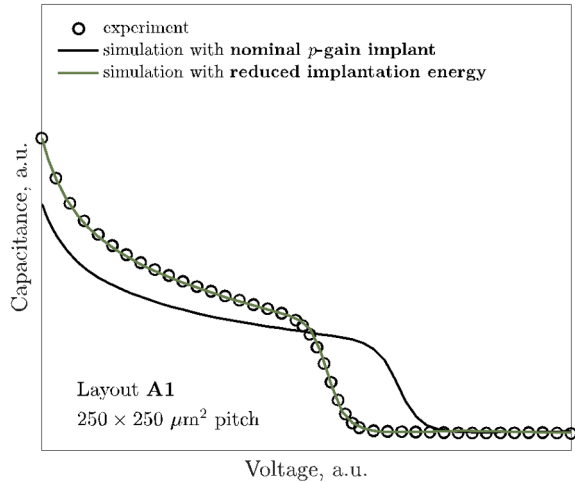
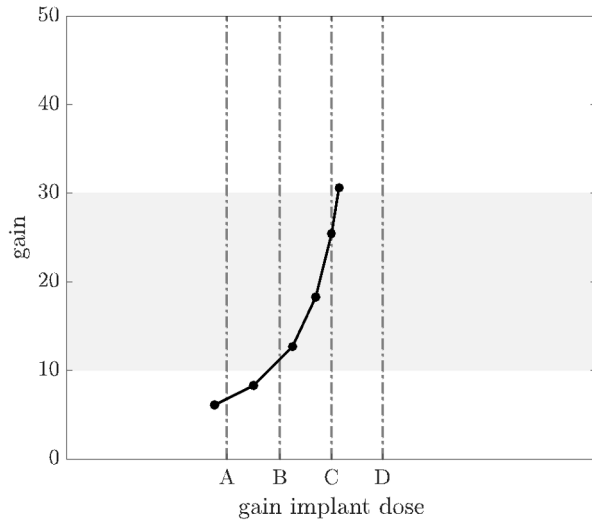
Black line: TCAD simulation of expected C(V) profile with the nominal implant

Open circle: experimental data from sensor characterization in lab.

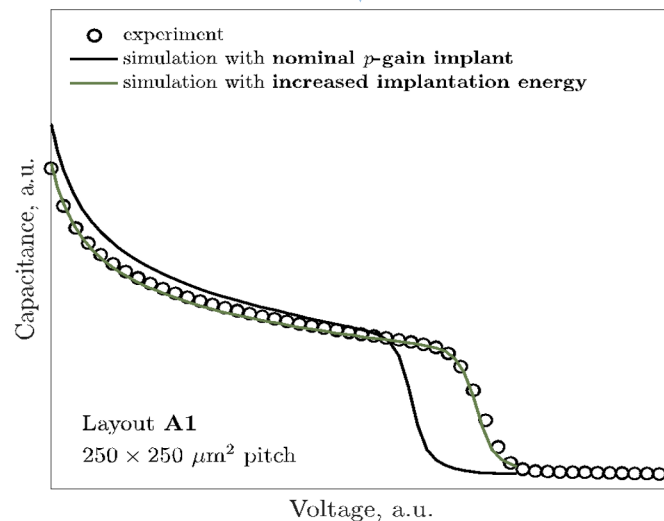
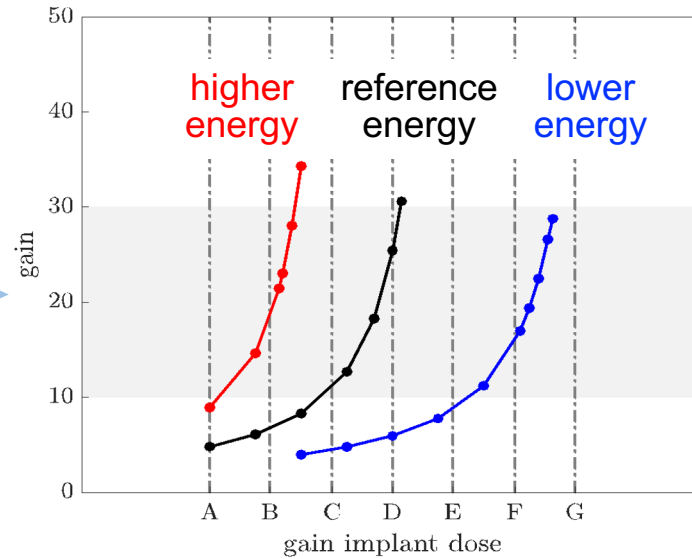
Green line: TCAD simulation of expected C(V) profile with a reduced implantation energy.

Simulation helped to identify the reason of the data-simulation mismatch and to give input to the foundry for a «short-loop» run

Run 3



Run 3.1 (1st short-loop run)



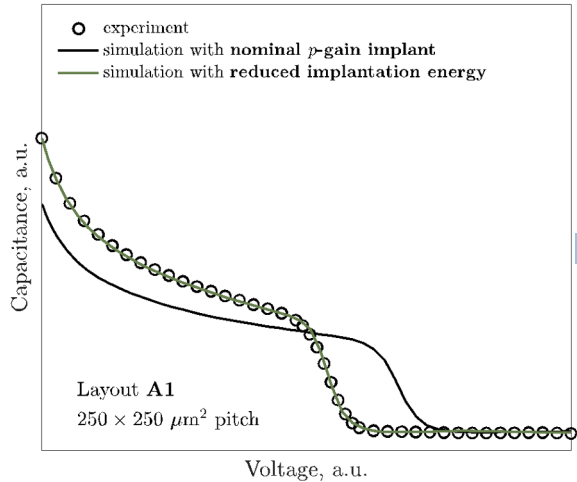
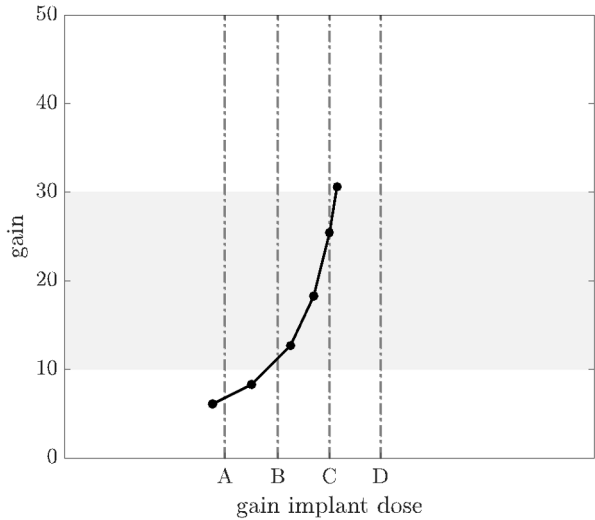
TCAD simulation of the gain vs implant dose

Larger number of splittings to cope with fabrication tolerances and uncertainties in simulation models

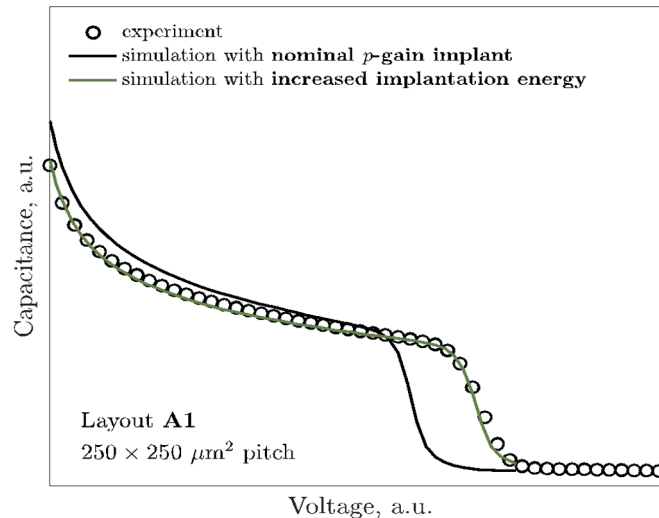
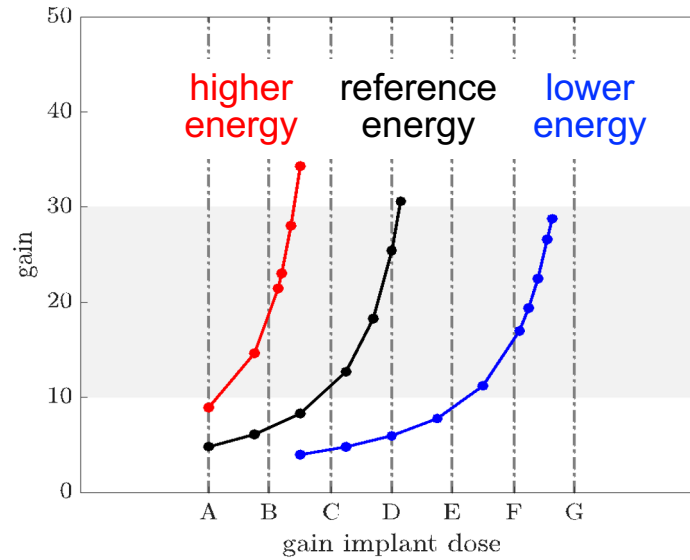
For the short-loop run the comparison between data and TCAD simulation is satisfactory within the tolerances.

We do not expect errors in the gain implant dose

Run 3



Run 3.1 (1st short-loop run)

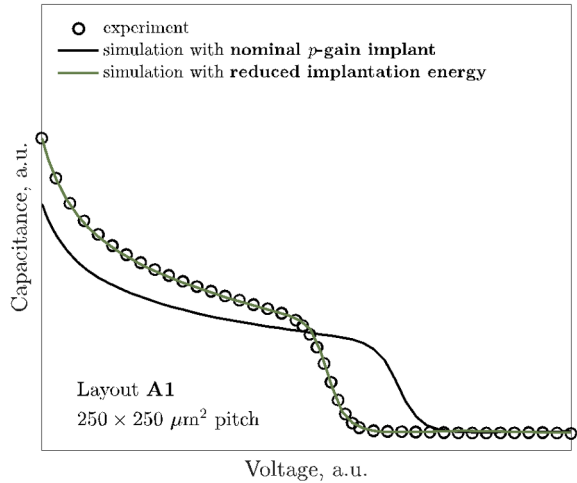
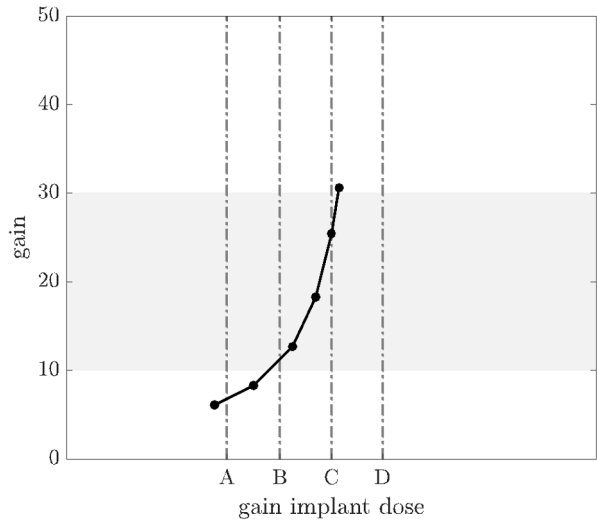


TCAD simulation of the gain vs implant dose

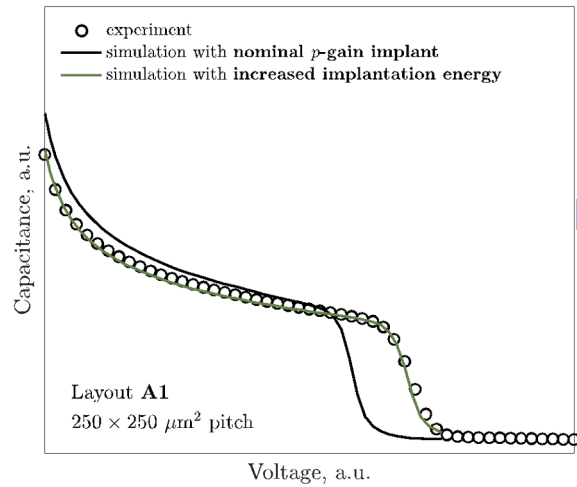
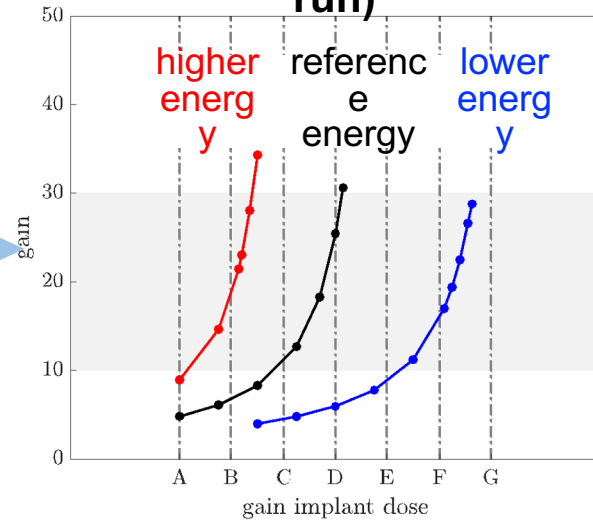
Larger number of splittings to cope with fabrication tolerances and uncertainties in simulation models

- First diced samples **available beginning of May 2024**
- **Problem in the process** identified after few weeks: **wrong substrate type was used**
- Agreement with LFoundry: **new short-loop run** using the same masks immediately started (**3 June 2024**)

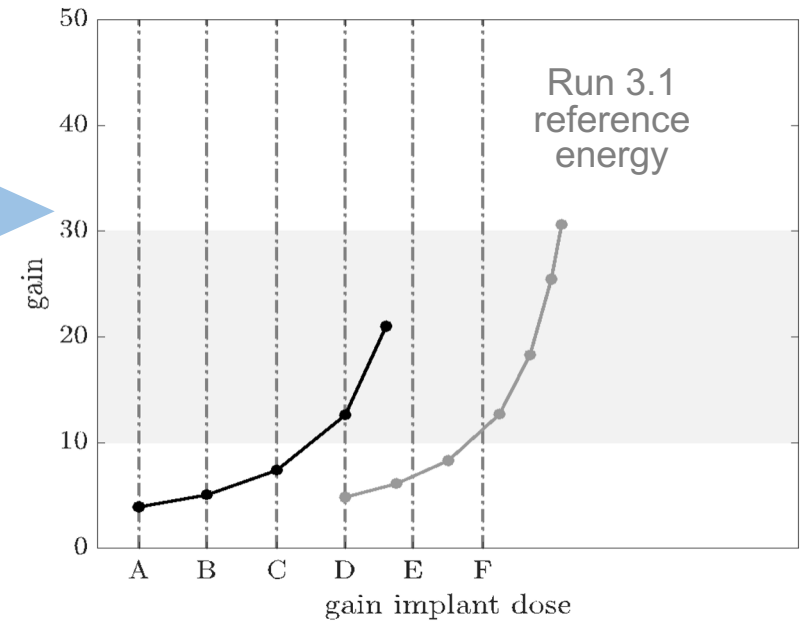
Run 3



Run 3.1 (1st short-loop run)



Run 3.2 (2nd short-loop run)



Experimental tuning of gain layer profile
Doping **splittings** re-centered based on
gain layer profiles tuned on
experimental data

**New sensors should be available
this year for the Autumn
test beam**



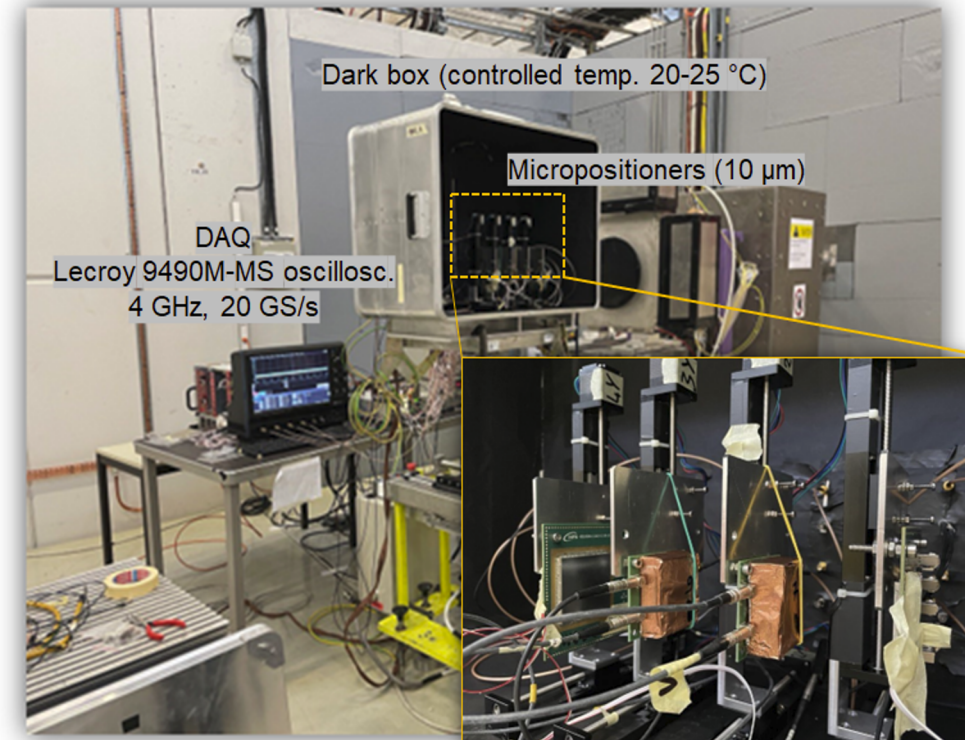
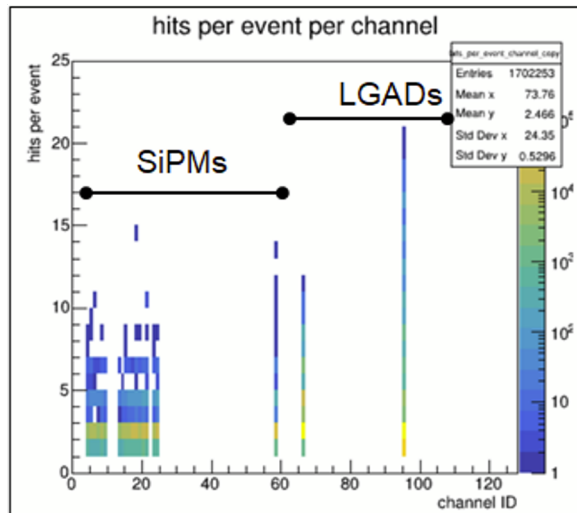
Attività di sviluppo front-end e data readout

Front-end and data readout

- **New front-end and data readout operational since April 2024** for all sensor types (LGAD, CMOS, SiPM)
 - **Liroc board** (based on Weroc front-end ASIC for SiPMs) developed at INFN-BO
 - **picoTDC board** (based on CERN picoTDC) developed at INFN-BO for the next upgrade of ALICE-TOF
- Liroc is not specifically designed for LGADs and CMOS-LGADs → will have a PFEB(-D) capable to deal with (post-amplification) signals with the [ADCMP573](#) as target comparator (design started)

Front-end and data readout

- **New front-end and data readout operational since April 2024** for all sensor types (LGAD, CMOS, SiPM)
 - **Liroc board** (based on Weroc front-end ASIC for SiPMs) developed at INFN-BO
 - **picoTDC board** (based on CERN picoTDC) developed at INFN-BO for the next upgrade of ALICE-TOF
- Liroc is not specifically designed for LGADs and CMOS-LGADs → will have a PFEB(-D) capable to deal with (post-amplification) signals with the [ADCMP573](#) as target comparator (design started)
- **Latest beam test (July 2024)** with:
 - discrimination of signals with opposite polarities (+/-) in 2 separate Liroc boards
 - DUTs:
 - **matrices of 3x3 SiPMs** with 1, 1.5, 3 thickness resin
 - LGAD (25, 50 μm) for reference time (also for CMOS)
 - CMOS will be discriminated/digitized from Oct 2024



ALICE 3 TOF

Stato attività pianificate per il 2024

L'attività di R&D per il 2024 prevede:

- **attività di caratterizzazione in laboratorio e analisi dei risultati del test beam** appena concluso e di quelli che otterremo nel test beam previsto in ottobre 2023
- **Sensori da testare:**
 - **stretta collaborazione tra i gruppi coinvolti** per organizzazione dei test beam in modo da poter testare più sensori possibili
 - test di MADpix su telescopio a ottobre e design test board dedicata
- **Modellazione e validazione del sensore:** l'attività di simulazione TCAD e Monte Carlo per CMOS con guadagno procederà in parallelo, con l'obiettivo di sviluppare sensori più sottili e ottimizzare le performance anche sulla base dei risultati dei test beam
- **Simulazioni TCAD dettagliate in corso**, con il supporto di LFoundry, e misure dello split high-dose. **Possibile un run di fabbricazione "short-loop"** usando le maschere di litografia del ER3 di ARCADIA per ottimizzazione del processo di impiantazione.

STATO ATTUALE

Test in laboratorio + analisi dei dati con pubblicazione per SiPM

Caratterizzazione MADpix nel test beam di Ott. '23: risultati accettati per pubblicazione su JINST
Primi risultati del test beam di inizio luglio

Attività continua e cruciale per design e confronto con i risultati sperimentali

Run completato. Grazie alla simulazione è stato individuato in poche settimane un mismatch tra i sensori richiesti e quelli prodotti

ALICE 3 TOF

Piano delle attività 2025

Goal: scelta delle tecnologia che permetta di raggiungere la risoluzione temporale desiderata (20 ps)

- **attività di caratterizzazione in laboratorio e analisi dei risultati del test beam:**
 - analisi dei dati raccolti nel test beam concluso il 10 luglio '24 al PS del CERN
 - caratterizzazione dei sensori CMOS-LGAD in laboratorio e con MIP nel test beam previsto a fine ottobre 2024
 - È stato cruciale il supporto delle CSN per richiedere tempestivamente un nuovo short-loop
- Test beam nel 2025: ci aspettiamo una schedula simile a quella degli ultimi anni con la possibilità di avere 2 test beam (in estate e in autunno)
 - Motivo della richiesta di finanziamento di due **run di fabbricazione "short-loop"** di cui uno sub-judice ai risultati che saranno ottenuti con i sensori CMOS-LGAD del primo run

ALICE 3 TOF

Piano delle attività 2025

Goal: scelta delle tecnologia che permetta di raggiungere la risoluzione temporale desiderata (20 ps)

- **attività di caratterizzazione in laboratorio e analisi dei risultati del test beam:**
 - analisi dei dati raccolti nel test beam concluso il 10 luglio '24 al PS del CERN
 - caratterizzazione dei sensori CMOS-LGAD in laboratorio e con MIP nel test beam previsto a fine ottobre 2024
 - È stato cruciale il supporto delle CSN per richiedere tempestivamente un nuovo short-loop
 - Test beam nel 2025: ci aspettiamo una schedula simile a quella degli ultimi anni con la possibilità di avere 2 test beam (in estate e in autunno)
 - Motivo della richiesta di finanziamento di due **run di fabbricazione "short-loop"** di cui uno sub-judice ai risultati che saranno ottenuti con i sensori CMOS-LGAD del primo run
- **Modellazione e validazione del sensore:** l'attività di simulazione TCAD e Monte Carlo per CMOS-LGAD procederà in parallelo, con l'obiettivo di comprendere i risultati dei test, sulla base dei quali sviluppare sensori con performance ottimizzate
- Sviluppo di un **sistema di front end e data-readout** ottimizzato per sensori di timing da utilizzare per la caratterizzazione in lab e con fascio → richieste presso la sede di BO
- Richieste servizi 2025: supporto delle Sezioni di TO e BO per collaborare agli studi di meccanica

ALICE 3 TOF: milestones e richieste 2025

1. (30/06/2025)

Simulazioni TCAD, Garfield ++ e AlpPix2 per ottimizzare, in termini di risoluzione temporale, il design dei sensori CMOS con guadagno sulla base dei risultati dei test in laboratorio e con fascio

2. (31/12/2025)

Caratterizzazione di sensori al silicio in laboratorio e con fasci di particelle per lo studio della performance in termini di risoluzione temporale

ALICE 3 TOF: milestones e richieste 2025

1. (30/06/2025)

Simulazioni TCAD, Garfield ++ e Allpix2 per ottimizzare, in termini di risoluzione temporale, il design dei sensori CMOS con guadagno sulla base dei risultati dei test in laboratorio e con fascio

2. (31/12/2025)

Caratterizzazione di sensori al silicio in laboratorio e con fasci di particelle per lo studio della performance in termini di risoluzione temporale

Consumo & inventariabile

Missioni per Test Beam

Sede	Importo k€
Bologna	23,5
Torino	23,5
Trento	9,4

Totale: 56,4 k€

Sede	Importo k€	Descrizione
Bologna	24	For beam tests and sensor characterization in the lab: fast discriminator x2 for LGAD and CMOS-LGAD, picoTDC board x2, Liroc x2, Desktop computer, Function generator, filters for optical setup (laser)
Bologna	3.8	TCAD licence for sensor simulations and design
Torino	20	For the characterization in the laboratory and have a TCT setup with full functionality: Power supply + tester + broadband amplifier, beam splitter and IR photcamera + cables and connector
Trento	4	Components for optical setup (sensor characterization with laser)
Torino++	91	Two Short loop run per sensori CMOS-LGAD

Totale: 51.8 k€ + 91k€ short-loop run