

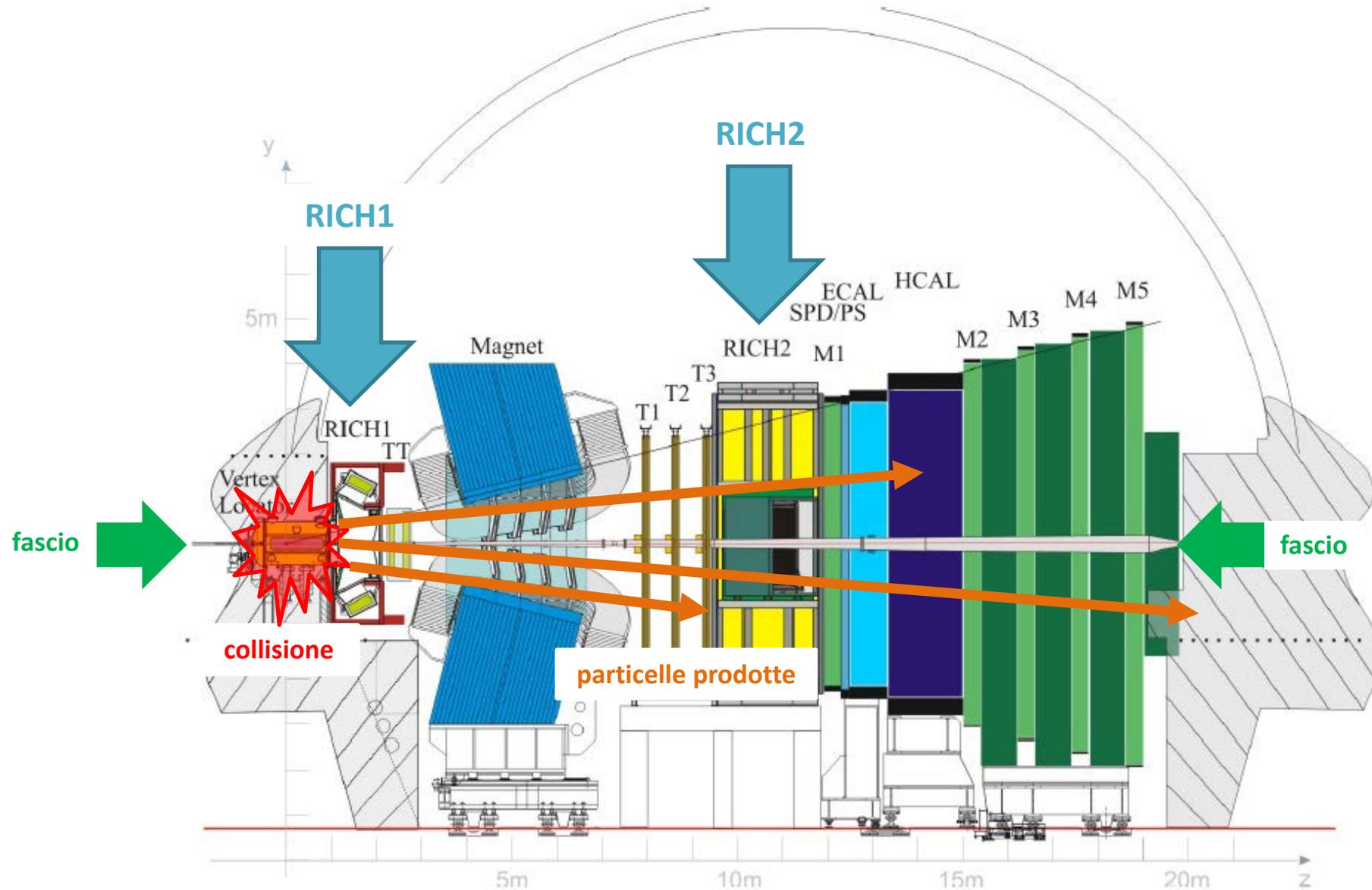
I rivelatori RICH di LHCb: stato e prospettive future

26 giugno 2020

Marta Calvi, Simone Capelli, Paolo Carniti, Claudio Gotti, Gianluigi Pessina

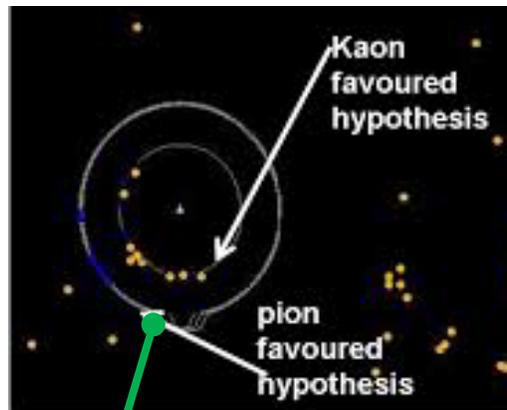
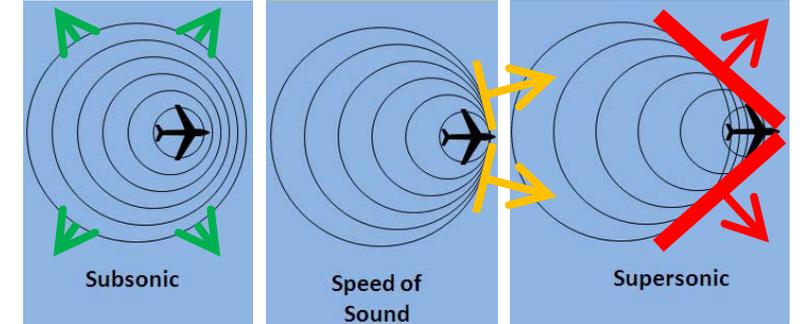
INFN & Univ. Milano-Bicocca

I rivelatori RICH di LHCb

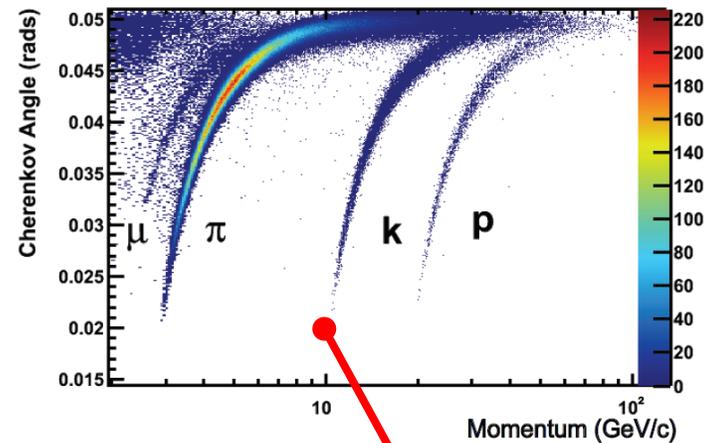


Effetto Cherenkov e identificazione particelle

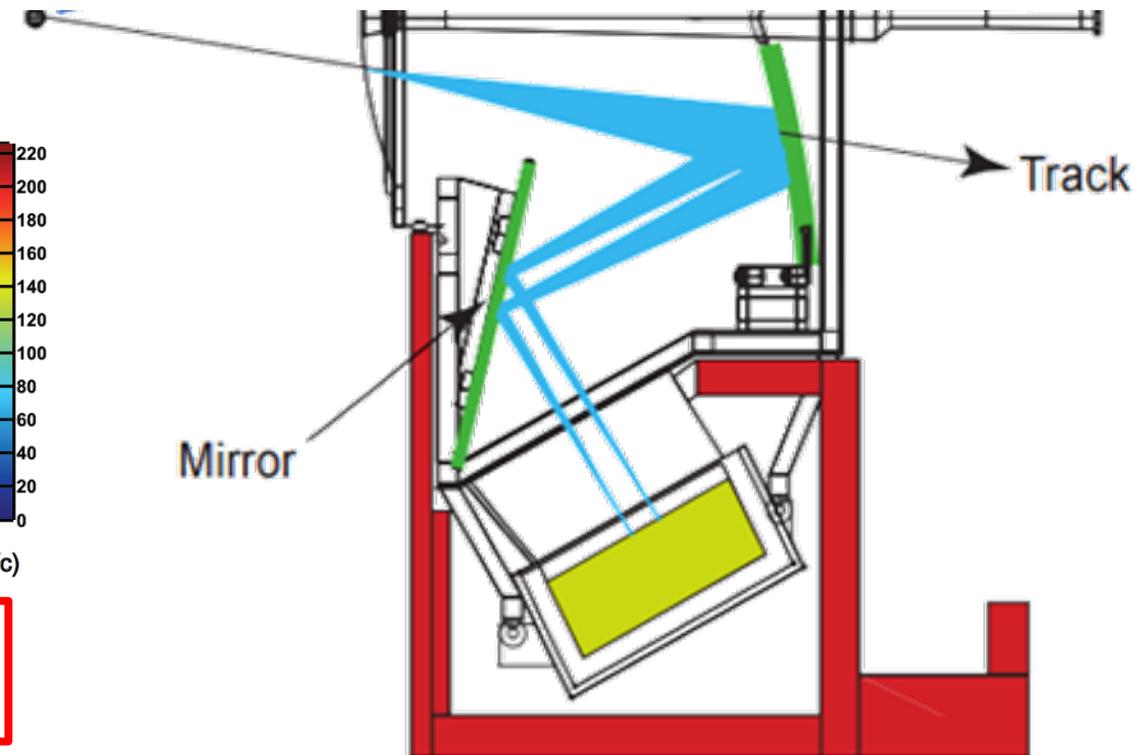
- Identificazione di particelle cariche
 - Velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo: $v > c/n$ (soglia per emissione fotoni Cherenkov)
 - ...ma non troppo: angolo Cherenkov $\cos\theta = 1/n\beta \rightarrow 1/n$ (saturazione a valore limite)
- Radiatore scelto in base a quali particelle occorre identificare, e in quale intervallo di momenti (\rightarrow valore di n)



Anelli di fotoni Cherenkov in RICH2



Angolo Cherenkov VS momento per radiatore (gas) C_4F_{10} in RICH1 ($n=1.0014$)

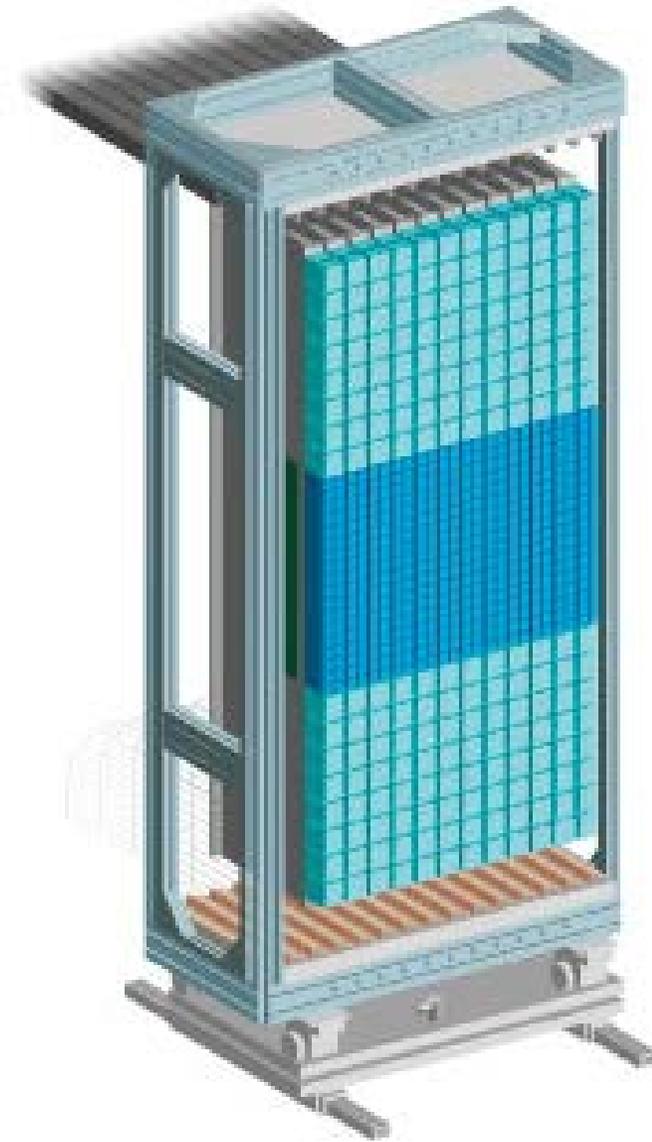
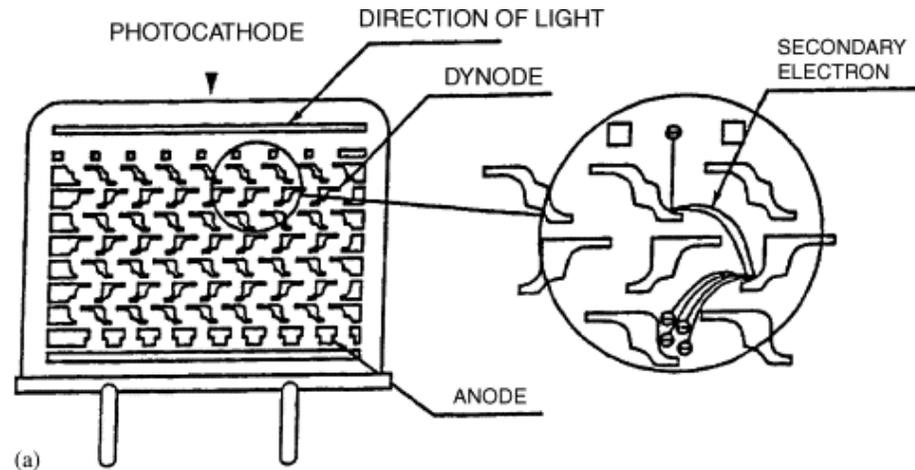


I piani di fotorivelazione: MaPMT

- Fino al 2018 nei RICH di LHCb sono stati impiegati fotorivelatori HPD (hybrid photon detector)
- A partire dall'anno prossimo, i RICH di LHCb impiegheranno **fotomoltiplicatori a multi-anodo (MaPMT)**:
 - R13742 (basato su R11265) – 64 (8x8) pixel in 1" × 1"
 - R13743 (basato su R12699) – 64 (8x8) pixel in 2" × 2"

Sfide tecnologiche:

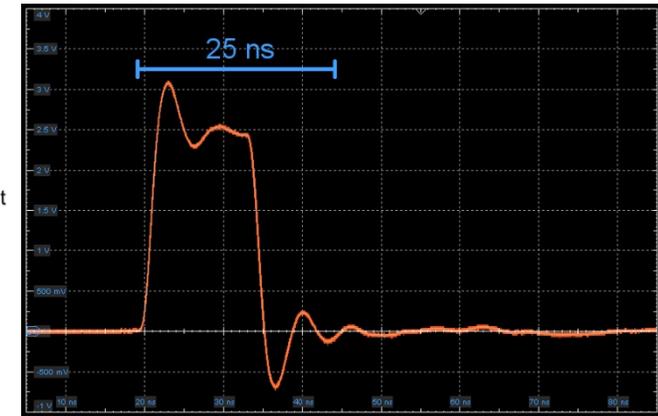
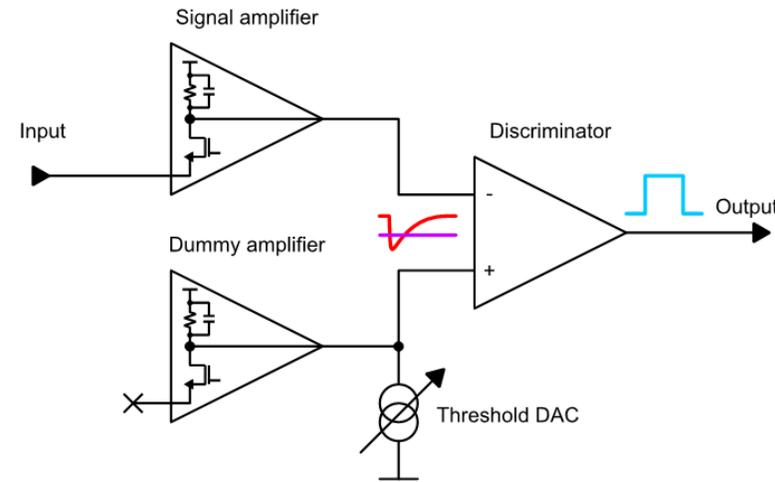
- Piani ($\approx m^2$) equipaggiati con fotorivelatori a pixel ($\approx mm^2$) sensibili a **singoli fotoni**
- **Alta velocità di lettura** ($\approx ns$) per sostenere tasso di ripetizione eventi a 40 MHz (occupancy $\approx 30\%$)



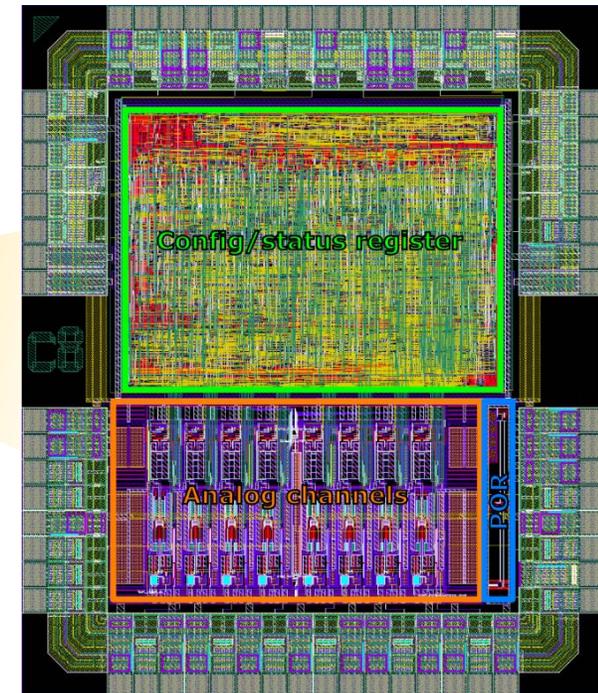
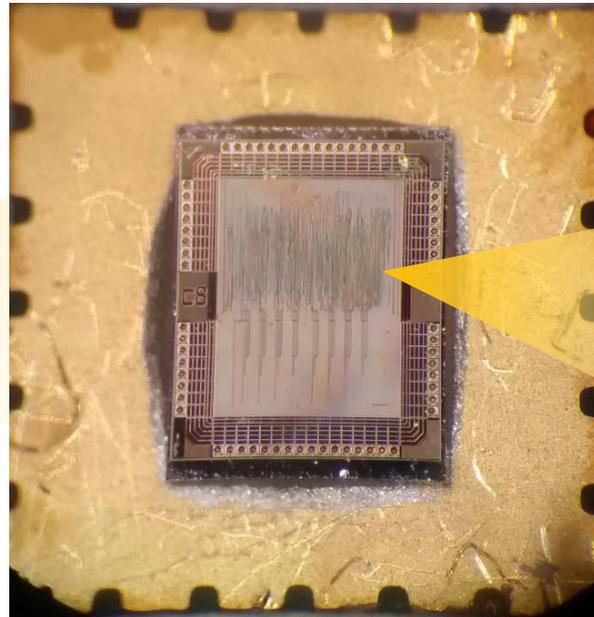
Elettronica di front-end

ASIC (application-specific integrated circuit) «CLARO»:

- 8 canali
- Ultra-veloce (risposta < 25 ns)
- Basso consumo (≈ 1 mW/canale)
- Resistente alla radiazione (≈ 10 kGy, 10^{13} n/cm²)
- Progettato a Milano Bicocca in collaborazione con Ferrara e Cracovia



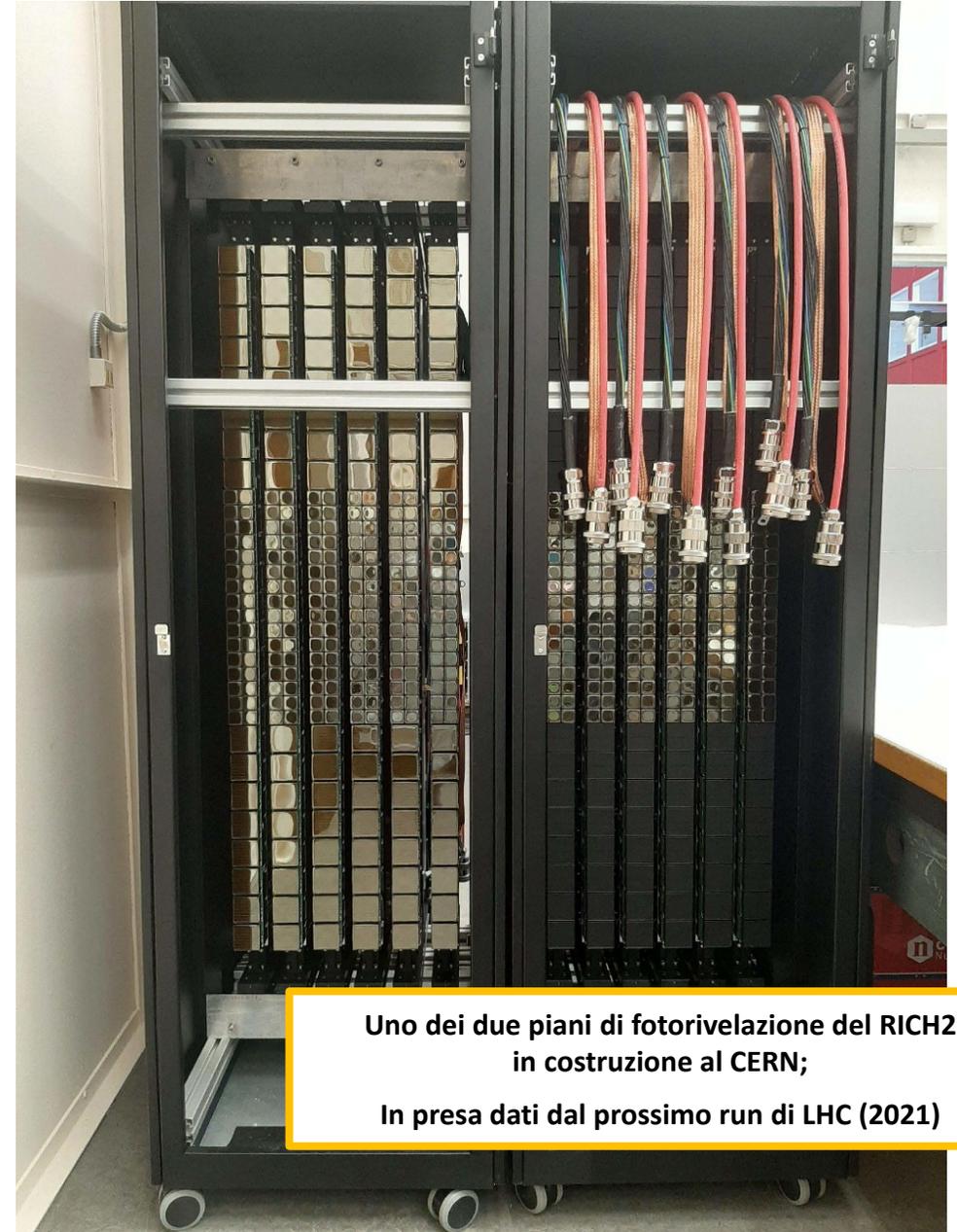
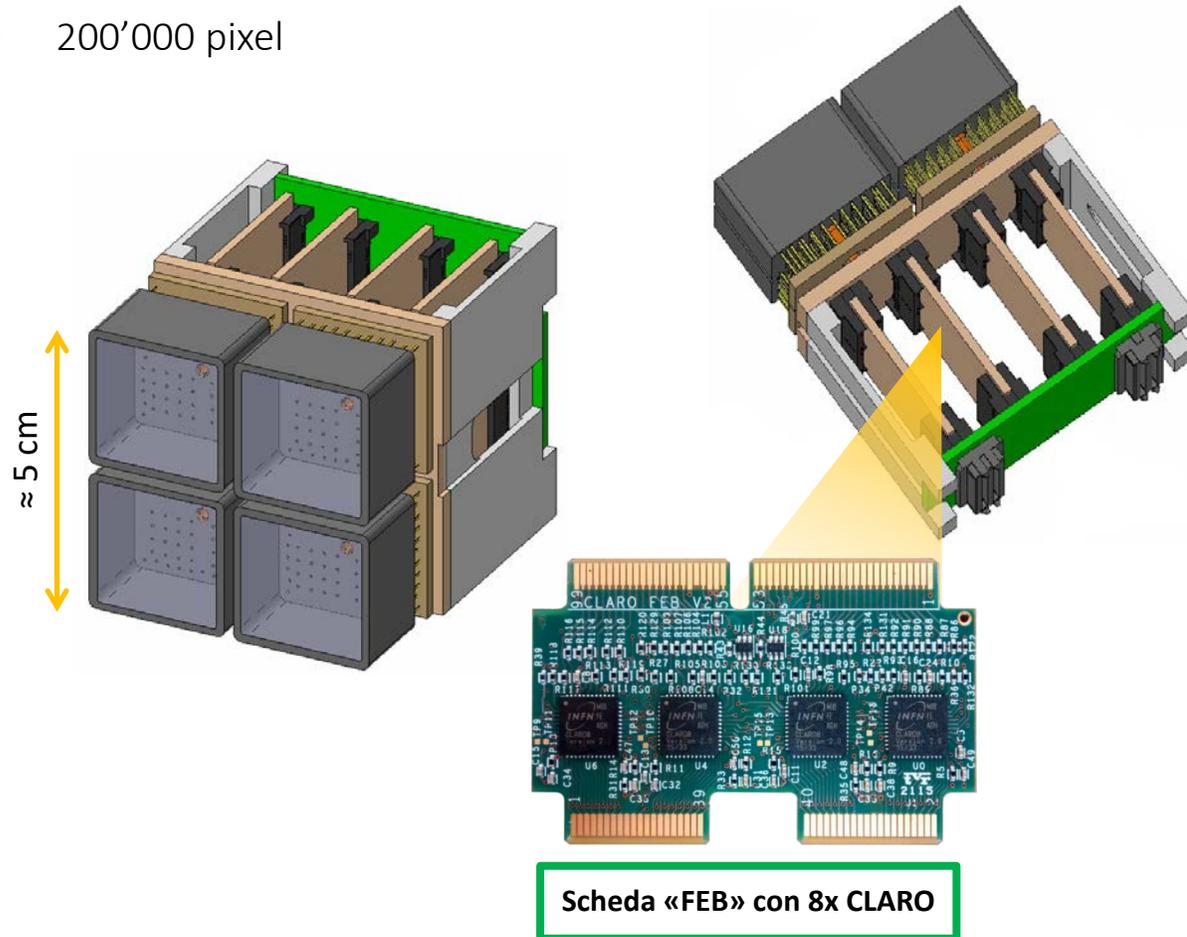
Tipico segnale da singolo fotone



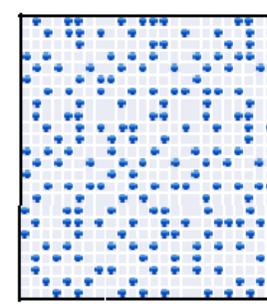
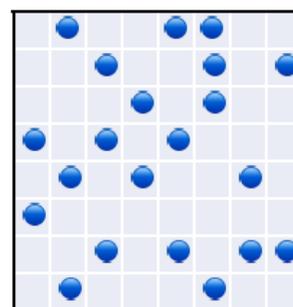
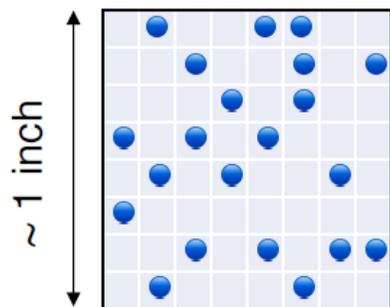
Elementary cell e sistema completo

In totale, tra RICH1 e RICH2:

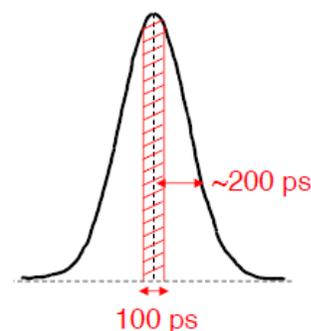
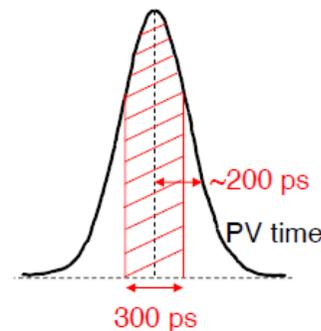
- 3'000 Fotomoltiplicatori
- 25'000 chip CLARO
- 200'000 pixel



E adesso?

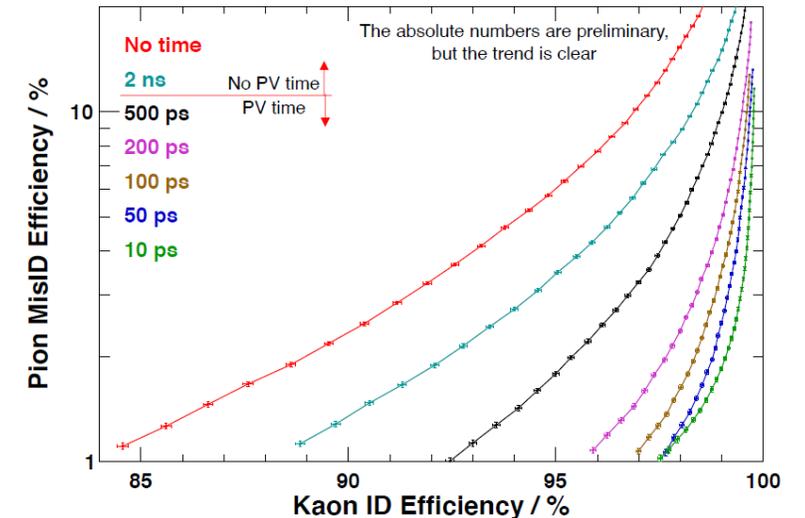
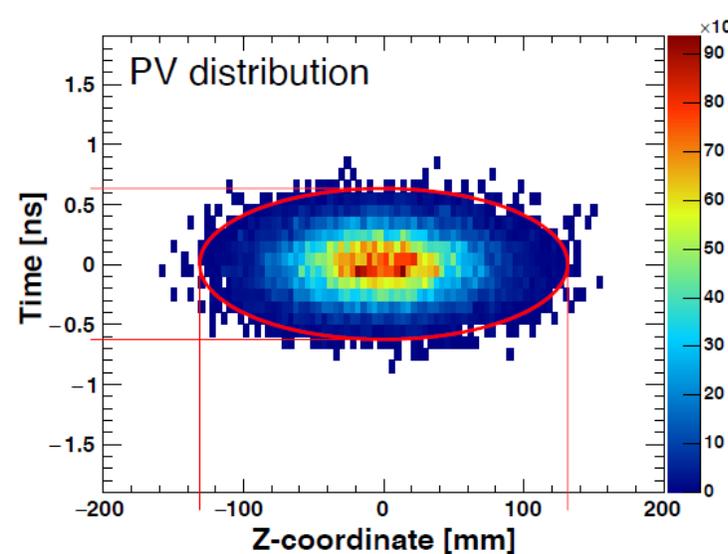
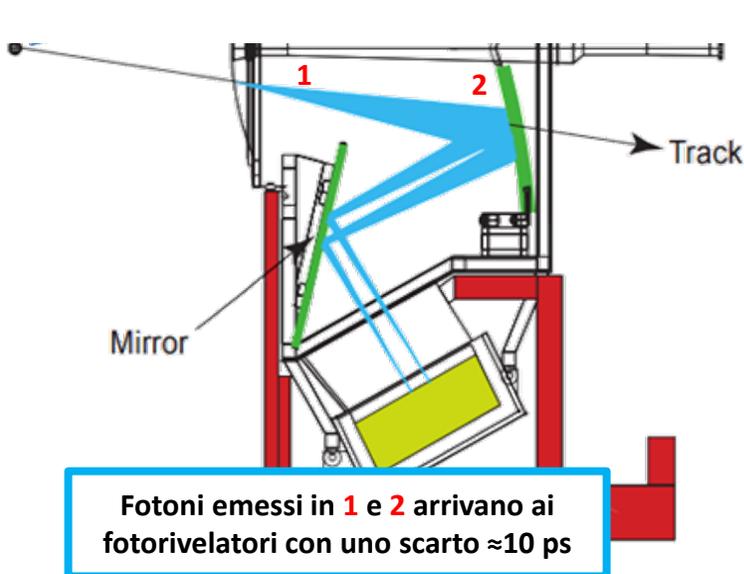


Il sistema che ho descritto finora

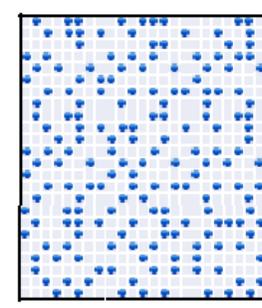
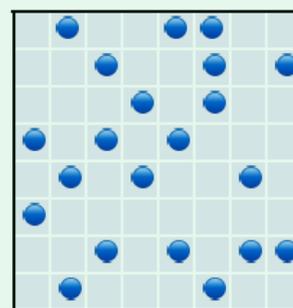
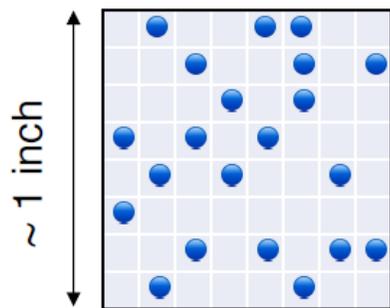


La misura di tempo

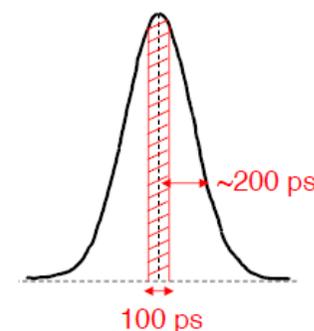
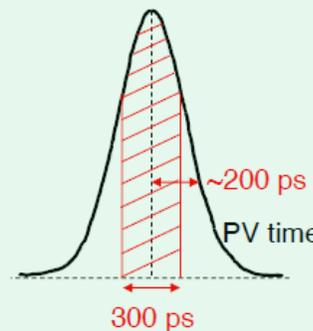
- L'emissione di fotoni Cherenkov è istantanea in ogni punto lungo il percorso della particella
- La differenza di cammino ottico tra i fotoni emessi in vari punti lungo il percorso è tale da cancellare la dipendenza in tempo: tutti i fotoni Cherenkov prodotti da una traccia nel RICH raggiungono i piani di fotorivelazione con uno scarto di ≈ 10 ps
- Larghezza in tempo del vertice primario: **200 ps RMS**
→ I fotoni «interessanti» arrivano ai fotorivelatori in una finestra di ≈ 200 ps RMS, che riflette la distribuzione in tempo del vertice primario
- Una misura in tempo con risoluzione di ≈ 1 ns permette di tenere solo i fotoni originati dal vertice primario, eliminando il resto (fondo)
→ miglioramento moderato nella capacità di distinguere π/k
- Una misura di tempo con risoluzione **<100 ps** permette di associare ogni traccia ai propri fotoni Cherenkov
→ miglioramento marcato nella capacità di distinguere π/k , anche a luminosità maggiore



Run 4 (2027)

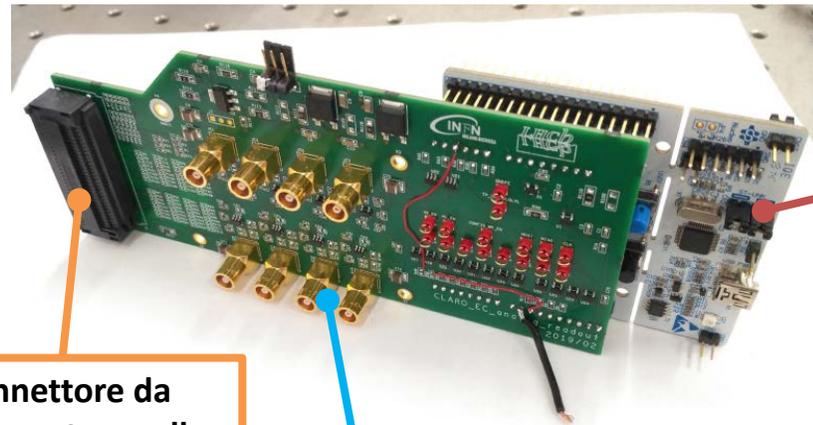
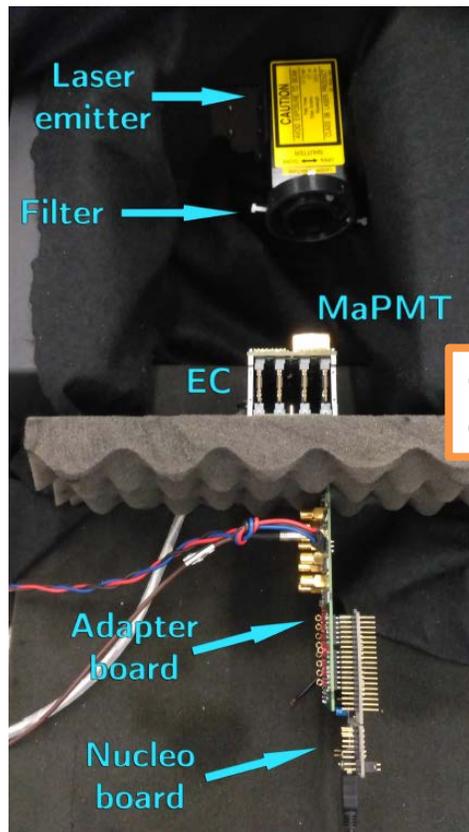


- Nessuna modifica ai fotorivelatori (fotomoltiplicatori multi-anodo)
- Modifiche mirate all'elettronica di lettura, puntando a risoluzione temporale dell'ordine di 500 ps FWHM



Risoluzione temporale della elementary cell

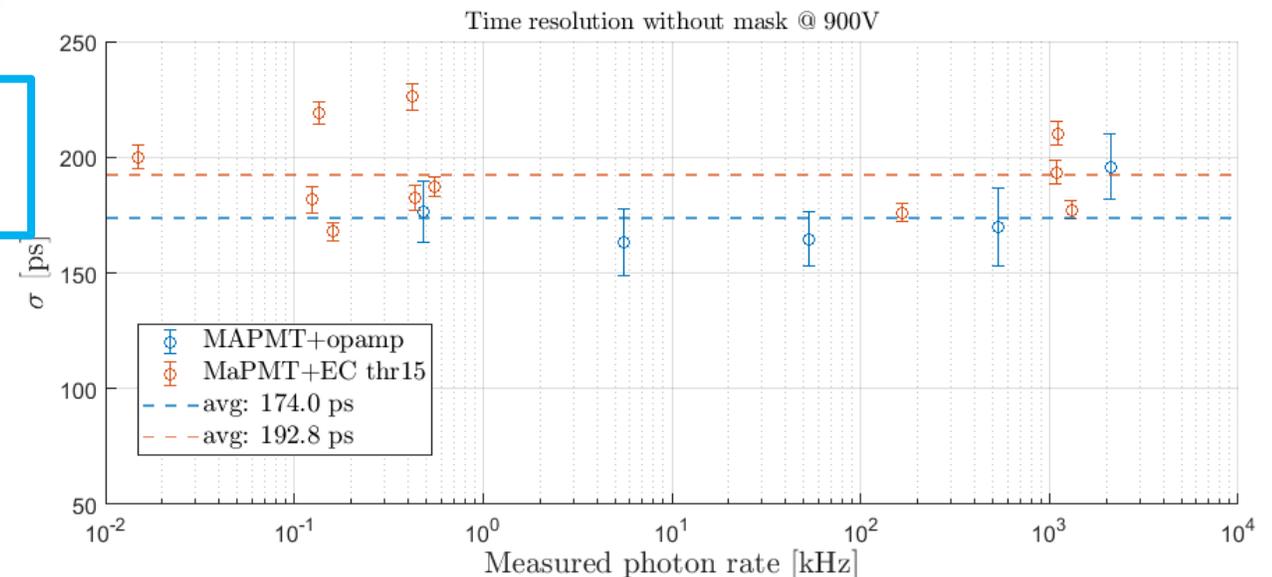
- Misura della risoluzione temporale della elementary cell (fotomoltiplicatore a multi-anodo + CLARO)
- Risultato: **174 ps RMS** per il solo MaPMT, **193 ps RMS** per MaPMT+CLARO → già compatibile con obiettivi del Run 4



Scheda di sviluppo microcontrollore ST Nucleo per gestire il controllo dei parametri del CLARO

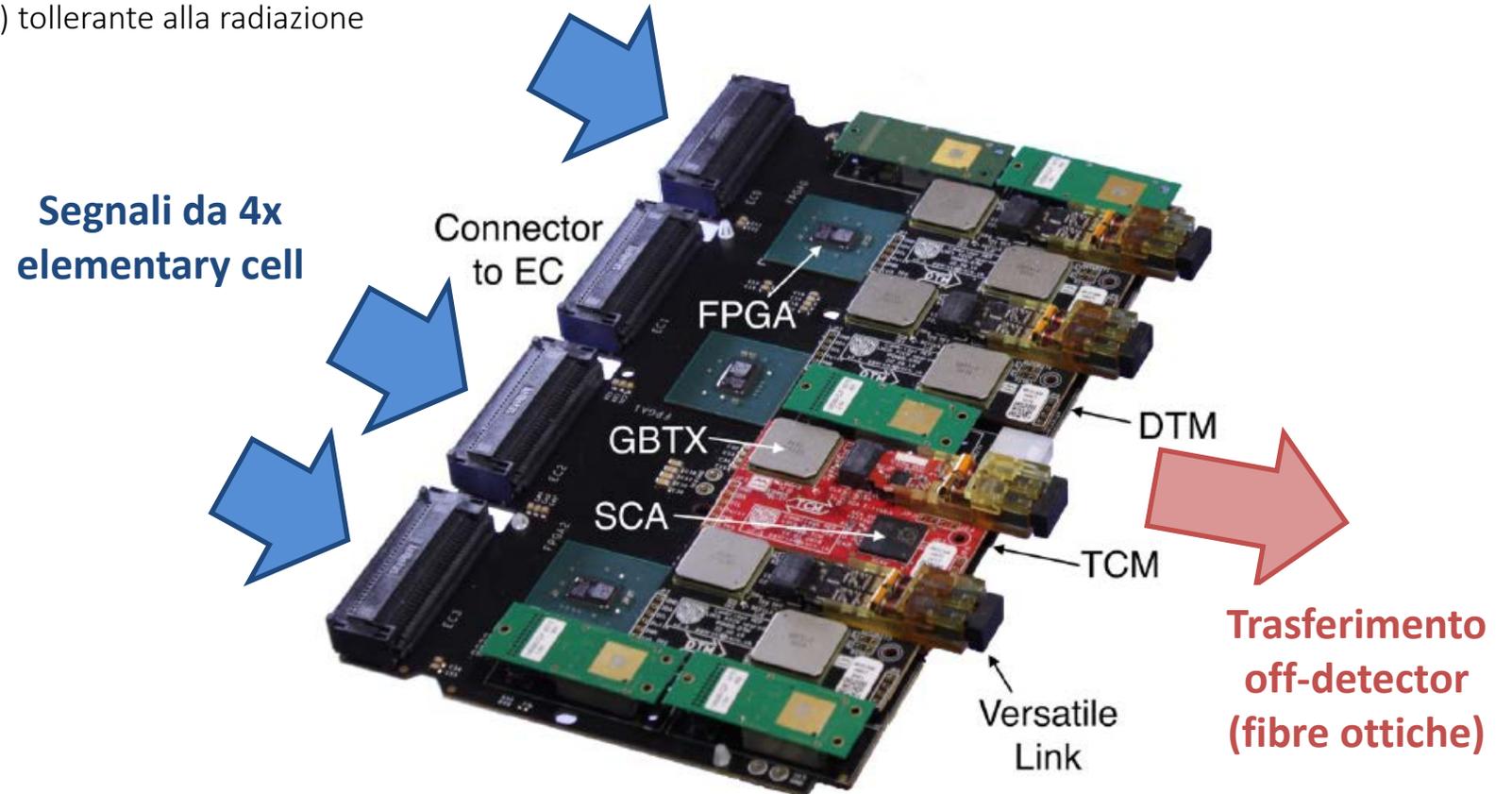
Connettore da elementary cell

Scheda per leggere i segnali in uscita dalla elementary cell (EC) con l'oscilloscopio

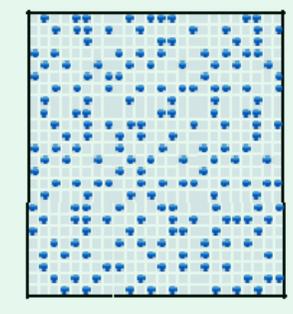
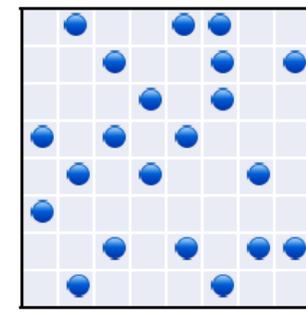
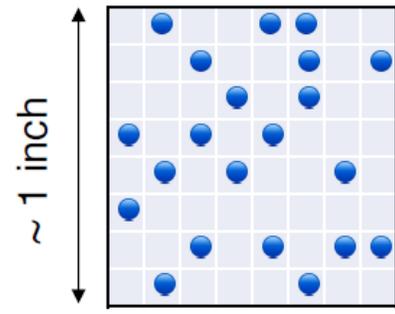


Nuova elettronica digitale per il Run 4

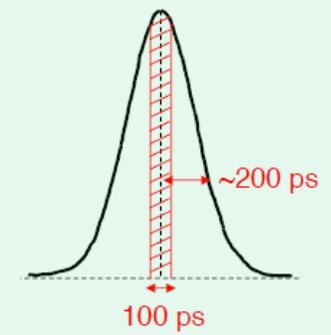
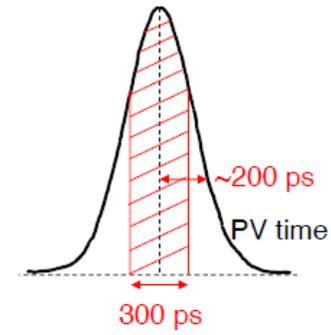
- La elementary cell offre già la risoluzione temporale adeguata, ma come usare questa informazione?
- Occorre riprogettare l'elettronica digitale che gestisce i dati in uscita dalla elementary cell
- Aumento della mole di dati da trasferire per includere informazione temporale
- Diverse possibilità in fase di studio:
 - FPGA (circuito digitale riprogrammabile) tollerante alla radiazione
 - ASIC interamente digitale
 - Soluzioni ibride (ASIC+FPGA)



Run 5 (2032)



- Luminosità x10 (numero di interazioni per bunch crossing)
- Pixel ≈10 volte più piccoli → **nuovi fotorivelatori**
- Risoluzione temporale sotto i 100 ps per separare fotoni Cherenkov provenienti da diverse tracce originate nello stesso bunch crossing → **nuova elettronica**
- Livello di radiazione x10



Nuovi fotorivelatori

- Fotorivelatori sensibili a singolo fotone: 3 principali candidati

	MaPMT	SiPM	MCP-PMT
Pixel size	X	✓	✓
Time resolution	X	✓	✓
Radiation hardness	✓	XX	✓
Low dark counts	✓	X	✓
Magnetic field immunity	X	✓	✓
Low cost	✓	✓	X
Ageing	✓	✓	XX
Saturation	✓	✓	XX
Low voltage operation	X	✓	X

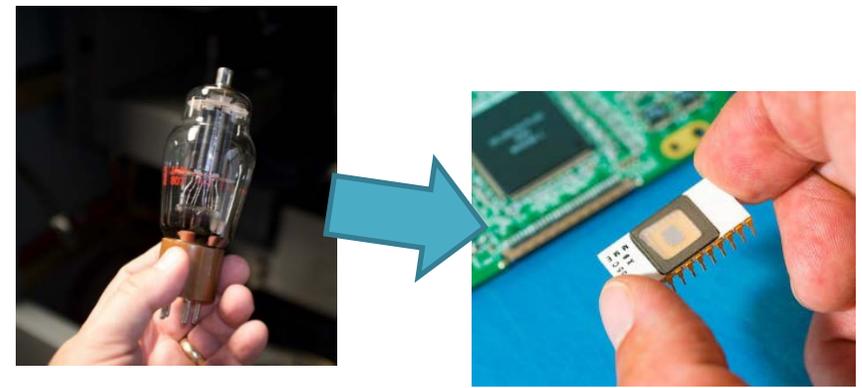
Nuovi fotorivelatori: MaPMT

- MaPMT non disponibili con pixel più piccoli di 3x3 mm²
- Risoluzione temporale non sufficiente

	MaPMT	SiPM	MCP-PMT
Pixel size	X	✓	✓
Time resolution	X	✓	✓
Radiation hardness	✓	XX	✓
Low dark counts	✓	X	✓
Magnetic field immunity	X	✓	✓
Low cost	✓	✓	X
Ageing	✓	✓	XX
Saturation	✓	✓	XX
Low voltage operation	X	✓	X

Nuovi fotorivelatori: SiPM

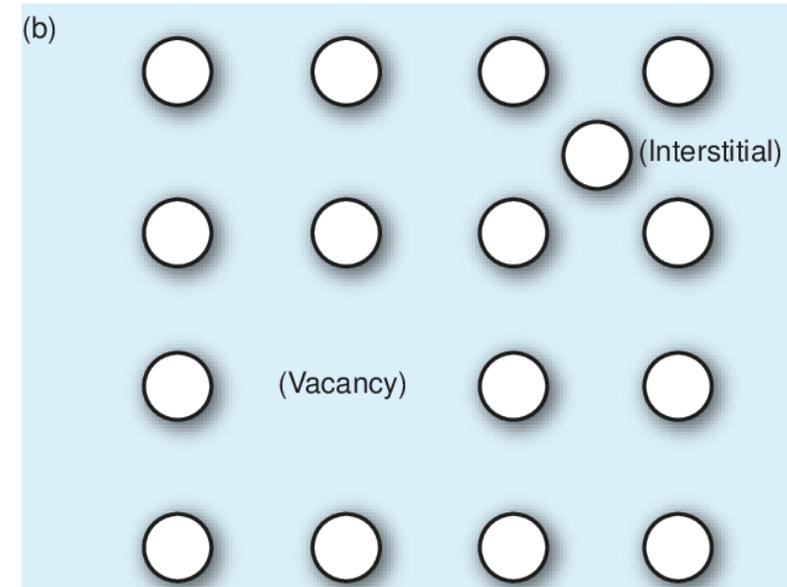
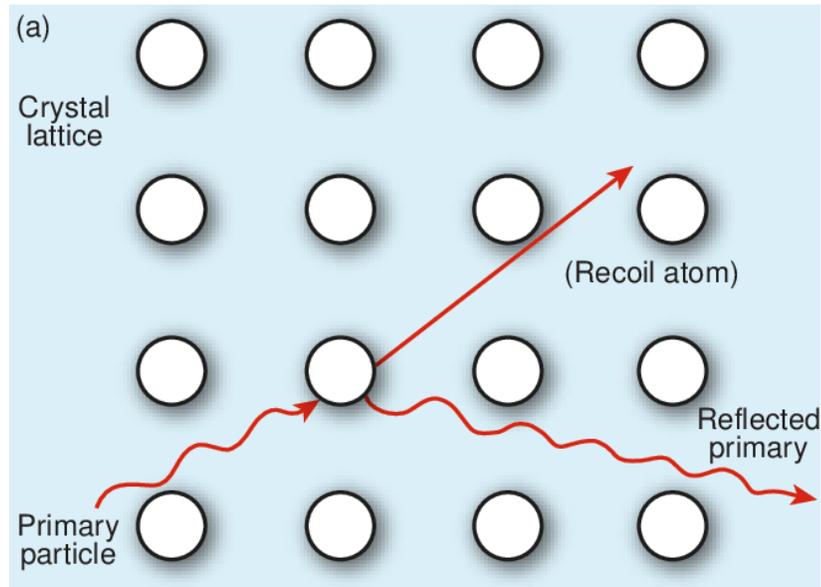
- Fotomoltiplicatori al silicio
- Semiconduttore > tecnologia a vuoto (vedi: transistor > valvole)
- Però: conteggi di buio molto più alti (kHz/mm^2 contro Hz/mm^2) e molto più sensibili alla radiazione



	MaPMT	SiPM	MCP-PMT
Pixel size	X	✓	✓
Time resolution	X	✓	✓
Radiation hardness	✓	XX	✓
Low dark counts	✓	X	✓
Magnetic field immunity	X	✓	✓
Low cost	✓	✓	X
Ageing	✓	✓	XX
Saturation	✓	✓	XX
Low voltage operation	X	✓	X

SiPM: danno da radiazione

- I SiPM sono particolarmente sensibili al danno da dislocamento (displacement): neutroni (o altri adroni) spostano atomi dalla loro posizione, introducendo difetti nel reticolo
- I difetti hanno livelli energetici intermedi nel band-gap del semiconduttore, e facilitano generazione e ricombinazione
- Questo causa un aumento drammatico dei conteggi di buio

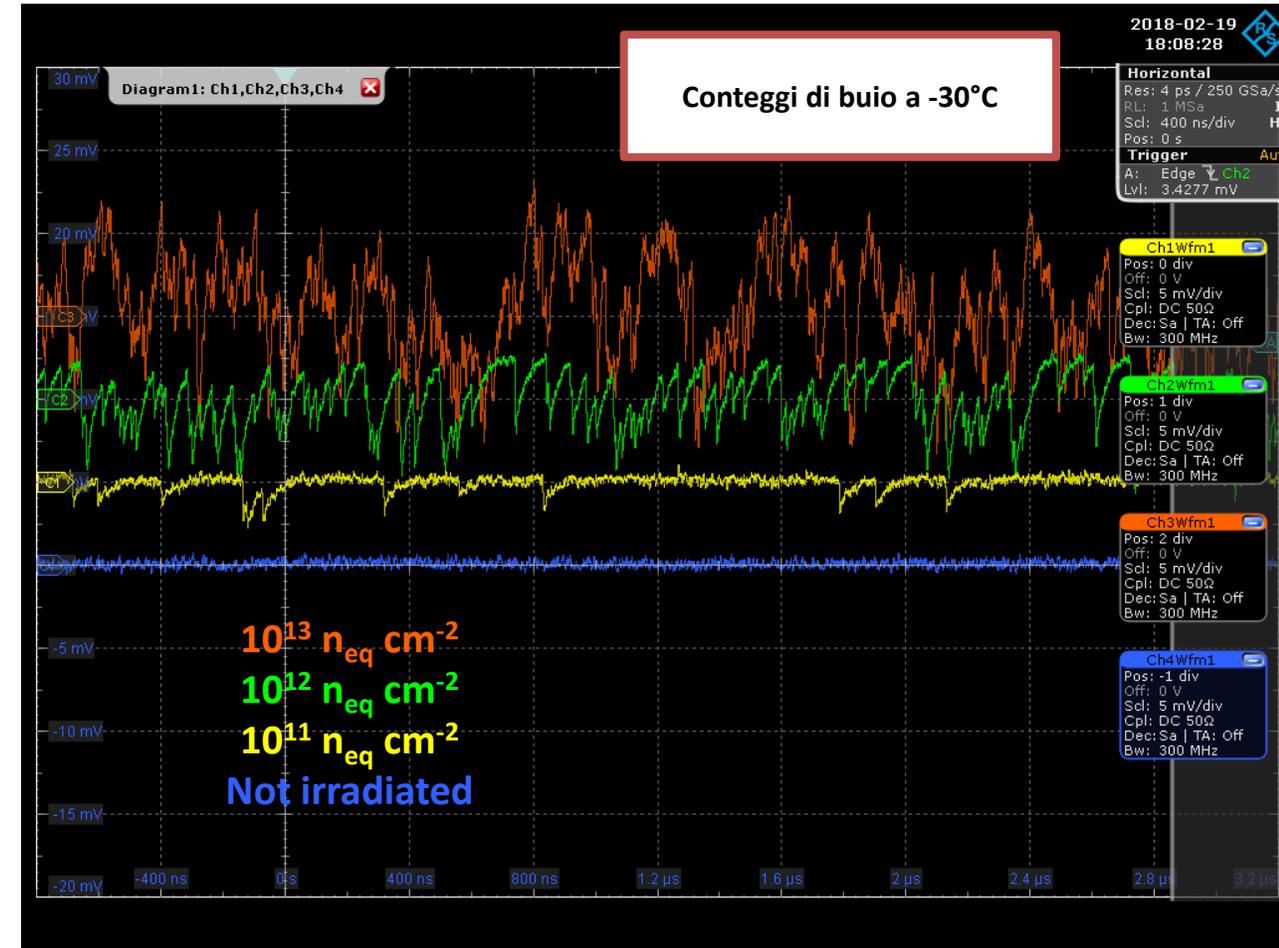
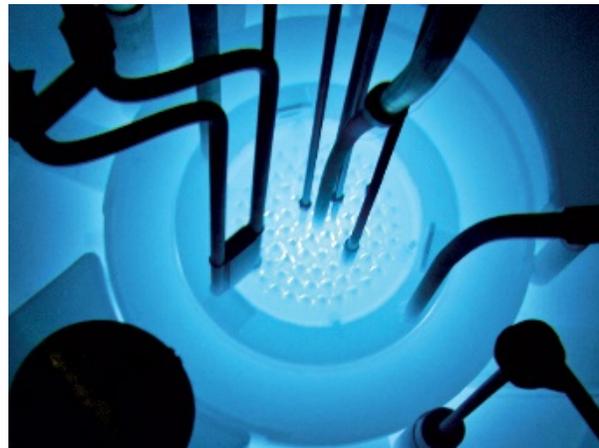


SiPM: irraggiamenti

- Irraggiamento di alcuni modelli di SiPM con neutroni al reattore del LENA di Pavia
- Aumento di DCR fino a $\approx \text{GHz}/\text{mm}^2$ ($T=-30^\circ\text{C}$) per fluenza $10^{14} \text{ n}/\text{cm}^2$

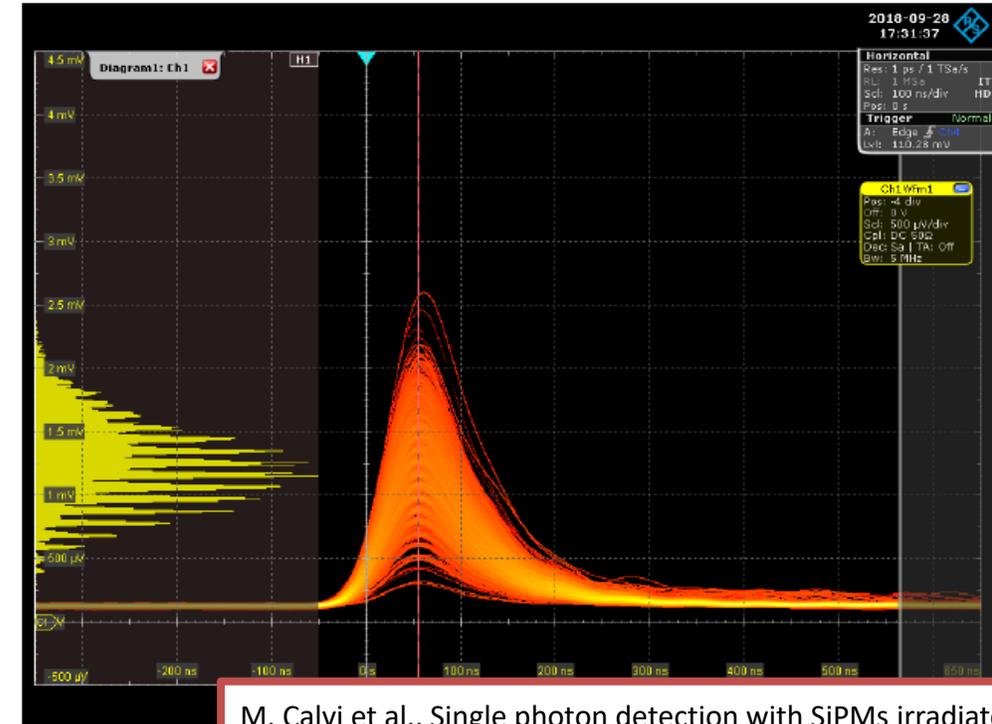
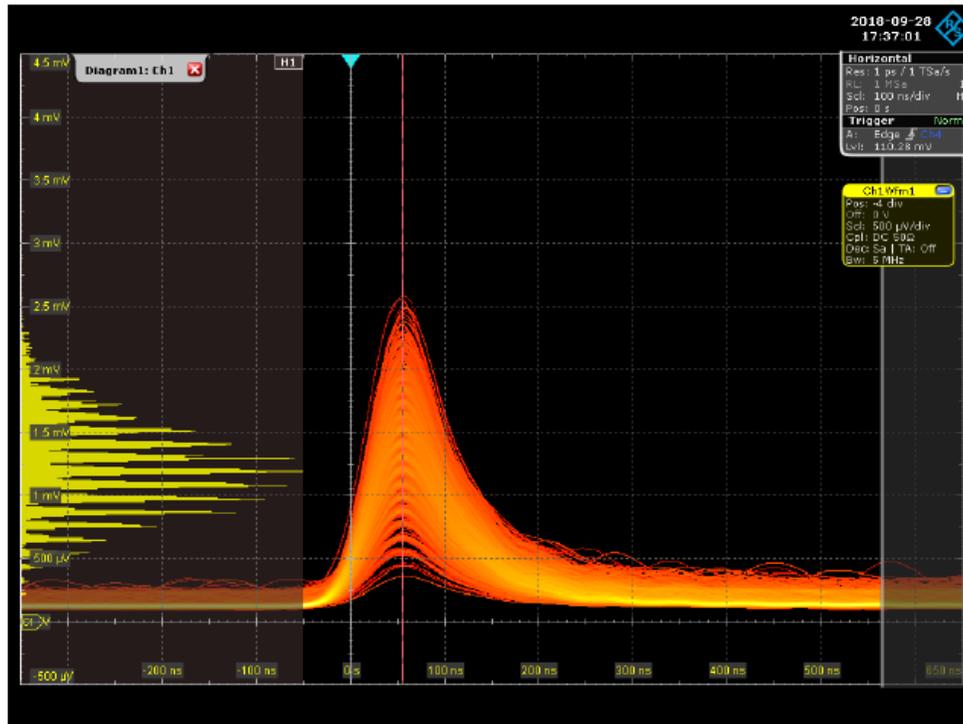


SiPM prima dell'inserimento nel reattore



SiPM: operazione a temperature criogeniche

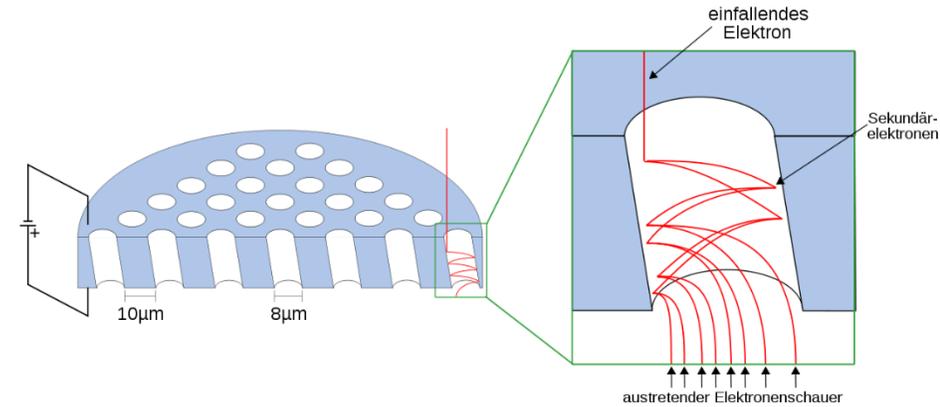
- Per quanto marcato sia il danno a T ambiente, anche i SiPM irraggiati a 10^{14} n/cm² sono utilizzabili per rilevare singoli fotoni...
- ...se mantenuti a temperature criogenica (T = 77 K)
- Le due immagini qui sotto corrispondono a due SiPM a 77 K, illuminati da un LED con una fibra ottica. Uno è nuovo, l'altro è stato irraggiato a 10^{14} n/cm². Qual è quello irraggiato?



M. Calvi et al., Single photon detection with SiPMs irradiated up to 10^{14} cm⁻² 1-MeV-equivalent neutron fluence
[10.1016/j.nima.2019.01.013](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.013)

Nuovi fotorivelatori: MCP-PMT

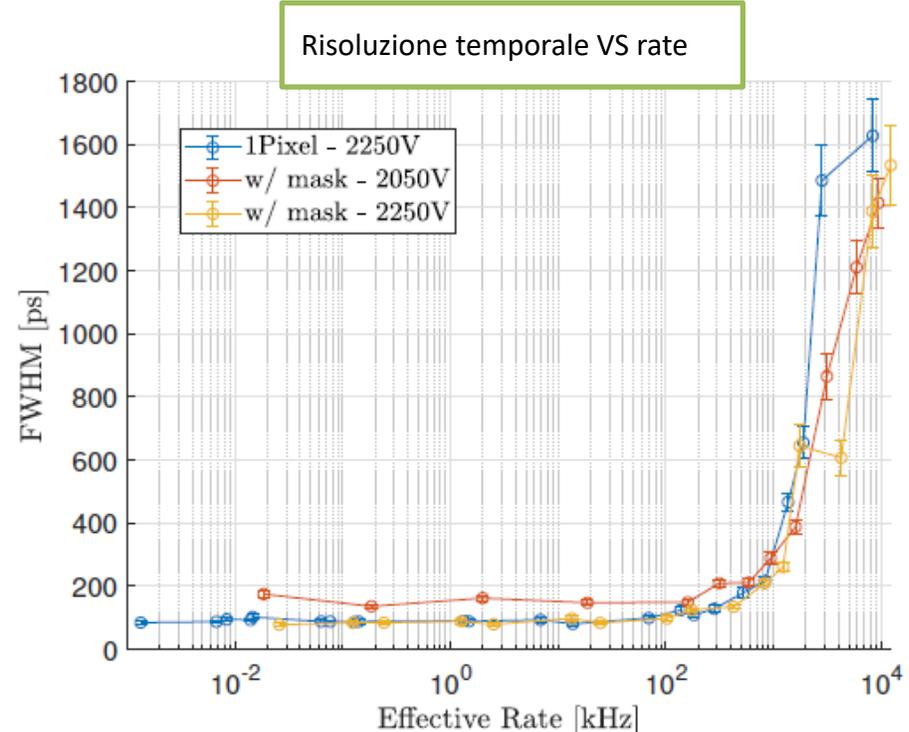
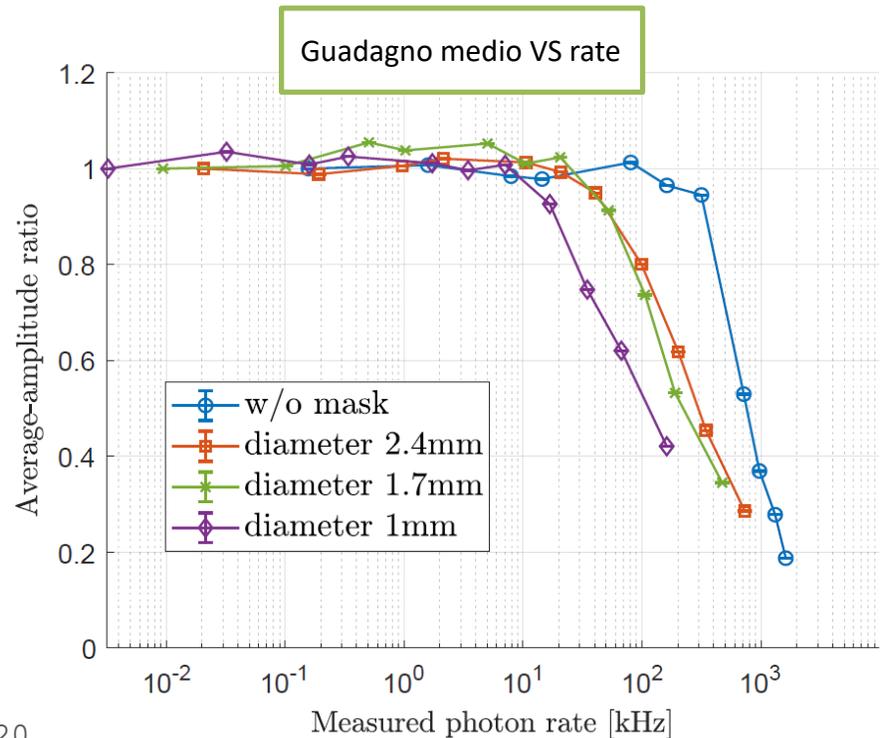
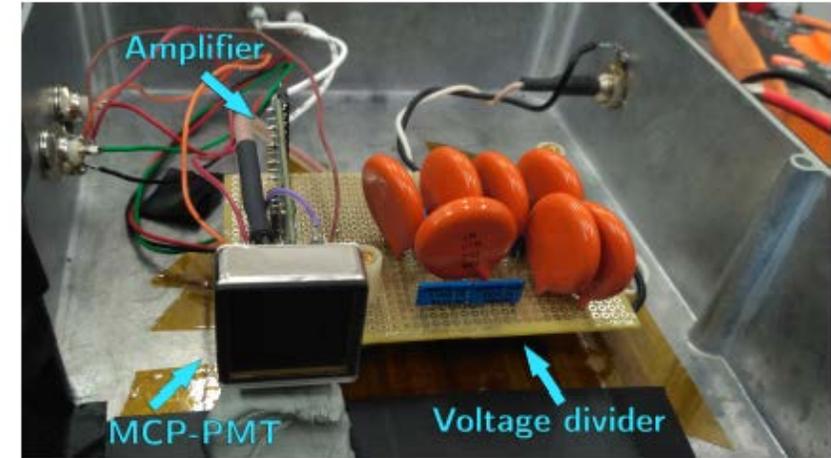
- Dispositivi a vuoto, come i PMT tradizionali
- Catena di moltiplicazione basata su «microcanali» continui anziché dinodi discreti
→ pixel fino a $< 1 \text{ mm}^2$
- Miglior risoluzione temporale
- Però: saturazione per alti tassi di conteggio, e invecchiamento



	MaPMT	SiPM	MCP-PMT
Pixel size	X	✓	✓
Time resolution	X	✓	✓
Radiation hardness	✓	XX	✓
Low dark counts	✓	X	✓
Magnetic field immunity	X	✓	✓
Low cost	✓	✓	X
Ageing	✓	✓	XX
Saturation	✓	✓	XX
Low voltage operation	X	✓	X

MCP-PMT: risoluzione temporale

- Saturazione (diminuzione dell'ampiezza media dei segnali) osservata a $\approx 10\text{-}100\text{ kHz/mm}^2$
- Corrispondente peggioramento della risoluzione temporale
- Il tasso di fotoni richiesto per il Run 5 è **10 MHz/mm²**
- Come mitigare il problema? Allo studio:
 - MCP a bassa resistività
 - Operazione a HV e guadagno ridotti



Sommario

- I rivelatori RICH di LHCb permettono l'identificazione di particelle cariche ($p/\pi/k$) misurando la loro velocità tramite la misura del punto di arrivo dei singoli fotoni Cherenkov
- Il sistema che prenderà servizio dal 2021 è basato su fotomoltiplicatori a multi-anodo:
 - Dimensione pixel: $3 \times 3 \text{ mm}^2$
 - Tasso di eventi fino a 40 MHz
- Run 4 (2027):
 - Potenziamento dell'elettronica di lettura per includere misura di tempo con risoluzione a 500 ps
 - Si cerca di spremere al massimo quello che abbiamo, sostituendo solo pochi elementi chiave
- Run 5 (2032):
 - Sostituzione dei fotorivelatori con una nuova generazione a pixel più piccoli, risoluzione temporale migliore
 - Riprogettazione dell'intero sistema
- Le date sembrano lontane nel tempo, ma il lavoro interessante di R&D è quello che si svolge adesso!
Opportunità di tesi a scelta tra:
 - Studio di fotorivelatori ad alta risoluzione temporale (SiPM, MCP-PMT)
 - Nuovi sviluppi di elettronica ultraveloce, a basso consumo, analogica e digitale
 - Studio del danneggiamento da radiazione, irraggiamento di componenti (fotorivelatori ed elettronica) su fascio e in reattore