

# Caratterizzazione di rivelatori a pixel resistenti alla radiazione per il tracciatore dell'esperimento CMS a High Luminosity LHC

Relatore: Dott. Marco Meschini (marco.meschini@fi.infn.it)

Correlatore: Prof. Raffaello D'Alessandro (candi@fi.infn.it)

Candidato: Rudy Ceccarelli (rudy.ceccarelli@stud.unifi.it)

Nel 2026 avrà inizio la Fase 2 di LHC, denominata *High Luminosity LHC* (HL-LHC), nella quale si potrà raggiungere una luminosità istantanea di  $\mathcal{L} = 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Grazie alla maggiore luminosità, sarà possibile studiare processi rari del Modello Standard (MS) e verificare l'esistenza di processi non previsti dal MS. I livelli di radiazione attesi sono senza precedenti, ponendo una sfida tecnica nella realizzazione dei rivelatori. L'esperimento CMS, uno dei principali presenti ad LHC e nell'ambito del quale ho svolto questo lavoro di tesi, sarà potenziato tra il 2024 e il 2026 per poter operare nelle condizioni previste per HL-LHC. Mentre tutti i rivelatori di cui è composto verranno aggiornati, il tracciatore in silicio sarà completamente sostituito.

Durante il mio lavoro di tesi ho utilizzato sensori a *pixel* di nuova concezione, con elettrodi di raccolta di carica che penetrano in profondità nello spessore del silicio di cui è costituito il sensore: questi nuovi *pixel* si definiscono '3D' proprio per questa loro caratteristica di avere un impianto profondo, lungo quanto lo spessore attivo del silicio, contrapposti ai classici *pixel* planari '2D' che hanno un impianto superficiale di piccolo spessore. Grazie a queste peculiarità costruttive, i sensori 3D possono avere ottime prestazioni anche in presenza di considerevoli danni da radiazione, rendendoli particolarmente adatti ad essere impiegati negli strati più interni del tracciatore di CMS. I sensori sono accoppiati ad un circuito elettronico di lettura, formando un modulo di rivelatore: non disponendo ancora di una elettronica finale resistente alle radiazioni, mi sono basato sul *chip* (PSI46dig) che viene attualmente utilizzato nell'esperimento CMS per la lettura dei *pixel* di dimensione  $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ . Per verificare la resistenza al danneggiamento da radiazione dei moduli, questi sono stati sottoposti ad un intenso flusso di protoni (o di neutroni), detto processo di irraggiamento, fino a raggiungere condizioni simili a quelle aspettate dopo circa cinque anni di funzionamento di HL-LHC. In questo lavoro di tesi sono stati analizzati vari moduli 3D sia prima che dopo l'irraggiamento.

Il lavoro è iniziato con la calibrazione in laboratorio dei moduli 3D; successivamente è stato utilizzato il fascio di protoni da 120 GeV al Fermilab (USA) per poter studiare l'efficienza di rivelazione di particelle, e confrontarla con quella ottenuta prima dell'irraggiamento.

Ho misurato l'efficienza di moduli 3D, con passo del sensore di  $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ , con due o tre elettrodi di raccolta per cella. Prima dell'irraggiamento, la configurazione con due elettrodi appare leggermente più efficiente a causa delle minori inefficienze intrinseche dovute alla presenza degli impianti colonnari. Dopo l'irraggiamento il modulo con configurazione a tre elettrodi è decisamente più efficiente, per via del campo elettrico più intenso (a parità di tensione di polarizzazione) e della minore distanza di raccolta della carica. L'efficienza ottenuta per il modulo con configurazione a tre elettrodi, dopo essere stato irraggiato con protoni ad una fluensa di  $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ , è di  $(95.8 \pm 0.1)\%$  ad una tensione di polarizzazione di 200 V.

Per ottenere informazioni anche sui sensori con il passo previsto per HL-LHC, cioè  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  e  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ , non avendo a disposizione un *chip* di lettura con questo passo, si è scelto di disegnare la maschera metallica dei sensori in modo da poter essere letti dal *chip* PSI46dig. Rispetto ai risultati ottenuti prima dell'irraggiamento, il modulo con passo di lettura di  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , irraggiato ad una fluensa di  $3 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ , ha mostrato un calo di efficienza attorno al 6% mentre il modulo con passo di lettura di  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ , irraggiato ad una fluensa di  $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ , ha mostrato un calo di efficienza attorno al 7%.

Oltre ai sensori 3D, ho analizzato dei moduli planari con tecnologia *Active Edge*, che sono progettati per presentare un'alta efficienza anche all'esterno della regione dei *pixel*. Ho ottenuto ottimi risultati in questo senso, con una efficienza fino al 70% a  $70 \mu\text{m}$  dalla fine dell'ultimo impianto dei *pixel*.

I risultati illustrati in questo lavoro di tesi contribuiranno in modo significativo a determinare la scelta del rivelatore a *pixel* che verrà installato negli strati più interni del futuro tracciatore di CMS.