

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”  
Corso di Laurea in Fisica

# Costruzione e test di un telescopio MAPS per il tracciamento di particelle

Relatore:  
Prof.ssa Gilda Scioli

Presentata da:  
Lorenzo Giordani

Correlatore:  
Dott. Riccardo Ricci

Anno Accademico 2024/2025



# Sommario

L'electron-Proton Ion Collider (ePIC) è un progetto di collaborazione internazionale che ha come obiettivo la costruzione di un nuovo rivelatore di particelle allo scopo di studiare, mediante diverse tecniche di rivelazione, i prodotti delle collisioni generate dall'Electron-Ion Collider (EIC), un futuro acceleratore la cui costruzione inizierà nel 2026. Una componente fondamentale del rivelatore ePIC, utilizzata per l'identificazione delle particelle tramite radiazione Cherenkov, sarà il dual-radiator Ring-Imaging Cherenkov (dRICH). L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) della Sezione di Bologna ha costruito un prototipo in scala ridotta del dRICH, costituito da 8 Photon Detection Units (PDU) formate a loro volta da matrici di Silicon PhotoMultipliers (SiPM).

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è stata la costruzione, la configurazione e la validazione di un telescopio tracciante di particelle costituito da sensori MAPS, allo scopo di integrarlo e sincronizzarlo con il prototipo di dRICH cosicché in futuro sia possibile combinare la ricostruzione delle tracce da parte del primo con l'identificazione delle particelle da parte del secondo.

La verifica del funzionamento del telescopio tracciante è stata svolta in laboratorio a Bologna acquisendo e analizzando dati provenienti da rivelazioni di raggi cosmici. Inoltre è stato anche analizzato un campione di dati ottenuto, presso il Super Proton Synchrotron (SPS) al CERN, integrando la catena di acquisizione del telescopio con quella del prototipo di dRICH.





*Per te mamma*



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 EIC ed ePIC</b>	<b>5</b>
1.1 Electron-Ion Collider . . . . .	5
1.1.1 Il collider di particelle . . . . .	5
1.1.2 L'obiettivo di EIC . . . . .	6
1.2 ePIC: electron-Proton Ion Collider . . . . .	9
1.2.1 Il rivelatore e le sue componenti . . . . .	9
1.2.2 Effetto Cherenkov . . . . .	11
1.2.3 ePIC dual-radiator RICH . . . . .	12
1.2.4 Il prototipo di dRICH realizzato dall'INFN di Bologna . . . . .	13
<b>2 Aspetti teorici</b>	<b>15</b>
2.1 Raggi cosmici . . . . .	15
2.1.1 Raggi cosmici primari e secondari . . . . .	17
2.2 Semiconduttori al silicio, giunzioni P-N e diodi . . . . .	19
2.2.1 Drogaggio di un semiconduttore al silicio . . . . .	19
2.2.2 La giunzione P-N . . . . .	21
2.2.3 Il diodo: polarizzare una giunzione . . . . .	21
2.3 SiPM: Silicon PhotoMultipliers . . . . .	26
2.3.1 I fotomoltiplicatori . . . . .	26
2.3.2 I fotomoltiplicatori al silicio . . . . .	27
2.3.3 Struttura e funzionamento di una SPAD . . . . .	28
2.3.4 Prestazioni e limiti di un SiPM . . . . .	30
2.4 MAPS . . . . .	31
2.4.1 Transistor MOSFET . . . . .	31
2.4.2 Struttura di un MAPS . . . . .	32
2.4.3 Funzionamento di un MAPS . . . . .	33
2.4.4 Vantaggi dei sensori MAPS . . . . .	35

<b>3</b>	<b>Costruzione e test del telescopio MAPS</b>	<b>37</b>
3.1	Apparato sperimentale a Bologna . . . . .	37
3.1.1	Il sistema di trigger . . . . .	42
3.1.2	Acquisizioni svolte a Bologna . . . . .	44
3.1.3	Risultati a Bologna . . . . .	46
3.2	Apparato sperimentale presso il test beam a SPS . . . . .	55
3.2.1	Risultati del test beam . . . . .	57
	<b>Conclusioni</b>	<b>61</b>
	<b>Appendici</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Software di analisi</b>	<b>65</b>
A.1	Corryvreckan . . . . .	65
<b>B</b>	<b>Strumentazione</b>	<b>67</b>
B.1	Strumenti e dispositivi utilizzati . . . . .	67
	<b>Bibliografia</b>	<b>69</b>
	<b>Mediografia</b>	<b>72</b>

# Introduzione

La prossima costruzione dell'acceleratore Electron-Ion Collider (EIC) negli Stati Uniti presso il Brookhaven National Laboratory (BNL) aprirà a nuove possibilità di indagine della forza nucleare forte e dei meccanismi di interazione tra quark e gluoni che danno origine alla massa e allo spin nucleari. Contestualmente ad EIC, verrà costruito un nuovo rivelatore di particelle, chiamato electron-Proton Ion Collider (ePIC), con l'obiettivo di misurare e studiare i prodotti delle collisioni. Tra i vari sottosistemi che comporranno il detector ePIC è presente il dual-radiator Ring-Imaging Cherenkov (dRICH), un sistema ottico, costituito da 8 Photon Detection Units (PDU) formate da matrici di Silicon PhotoMultipliers (SiPM), che sfrutta i fotoni emessi dalle particelle per radiazione Cherenkov, allo scopo di identificarle.

In questo lavoro di tesi verrà presentata la costruzione e la messa in funzione di un telescopio tracciante di particelle con l'obiettivo di prospettare una futura integrazione durante i test beam del prototipo del dRICH di ePIC. In particolare ci si concentrerà sulla catena di trigger del telescopio, la cui portabilità è requisito fondamentale per l'integrazione del tracciante all'apparato di identificazione delle particelle.

Il Capitolo 1 descriverà brevemente l'Electron-Ion Collider e gli obiettivi che, grazie ad esso, ci si prospetta di raggiungere nei prossimi anni. Tale capitolo proseguirà con una descrizione degli elementi che comporranno il rivelatore ePIC, concentrandosi in particolare sulla struttura e sul funzionamento del dRICH, accennando brevemente anche al prototipo di quest'ultimo, in scala ridotta, realizzato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) della Sezione di Bologna.

Il Capitolo 2, dopo un breve accenno alla fisica dei raggi cosmici, introdurrà il funzionamento dei dispositivi al silicio che stanno alla base dei sensori di cui è costituito il telescopio, in particolare i Silicon PhotoMultipliers (SiPM) e i Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS).

Il Capitolo 3 presenterà una descrizione della setup realizzata per la costruzione del telescopio, focalizzandosi soprattutto sulla catena di conversione del segnale di trigger e sulla possibilità di utilizzare quest'ultima anche per l'integrazione del telescopio con altri apparati di misura. Infine verranno illustrati e commentati i risultati ottenuti da acquisizioni effettuate con raggi cosmici svolte nel laboratorio a Bologna, e quelli ricavati dai dati raccolti durante un test beam del gruppo ePIC-dRICH di Bologna presso il

Super Proton Synchrotron (SPS) al CERN, analizzandone similitudini e differenze allo scopo di validare il funzionamento del telescopio tracciatore.

# Capitolo 1

## EIC ed ePIC

### 1.1 Electron-Ion Collider

#### 1.1.1 Il collider di particelle

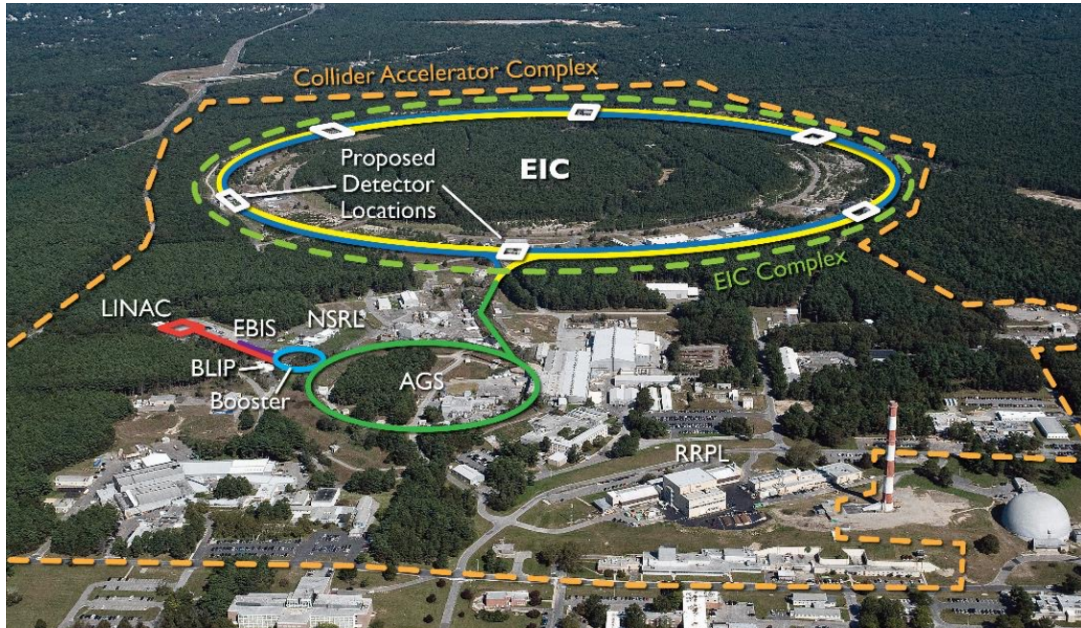
L'**Electron-Ion Collider** (EIC) è un nuovo acceleratore di particelle la cui costruzione inizierà presso il Brookhaven National Laboratory (BNL, Long Island, New York) negli Stati Uniti nel 2026 con la chiusura del progetto Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC), e la sua entrata in funzione è prevista per il prossimo decennio. Un *collider* è un particolare acceleratore in grado di far scontrare fasci di particelle opposti in modo da ottenere energie più elevate dei comuni acceleratori nei quali il fascio incidente colpisce un bersaglio fermo. EIC sarà così il primo collider di elettroni e ioni ad alta energia (con energia del centro di massa  $20 \leq \sqrt{s} \leq 140 \text{ GeV}^1$ ) e alta luminosità: esso colliderà un fascio di elettroni polarizzati con un fascio di protoni o ioni polarizzati, a differenza del suo precursore RHIC (nel quale si avevano collisioni tra soli fasci di ioni). Per la costruzione di EIC verranno riutilizzati alcuni componenti di RHIC, a partire dal tunnel circolare lungo  $3.8 \text{ km}$  (visibile in **Figura 1.1**), ma anche i pre-acceleratori già esistenti (costruiti tra gli anni '60 e '90 del secolo scorso, schematizzati in **Figura 1.2**). Il primo stadio di pre-accelerazione è l'Electron Beam Ion Source (EBIS) oppure l'acceleratore lineare (Linac) da  $200 \text{ MeV}$  (a seconda se si tratta di protoni o di ioni pesanti), da qui le particelle vengono ulteriormente accelerate dal sincrotrone AGS Booster e iniettate all'interno dell'Alternating Gradient Synchrotron (AGS), prima di raggiungere infine l'Electron-Ion Collider. [1]

---

<sup>1</sup>L'energia del centro di massa in una collisione relativistica è definita come:

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \cdot c^2}, \quad (1.1)$$

dove con  $E_1$  ed  $E_2$  si indicano le energie dei due corpi che partecipano all'interazione, e con  $\vec{p}_1$  e  $\vec{p}_2$  le loro quantità di moto.



**Figura 1.1:** Vista dall'alto dell'area del Brookhaven National Laboratory sulla quale sorgerà EIC. [26]

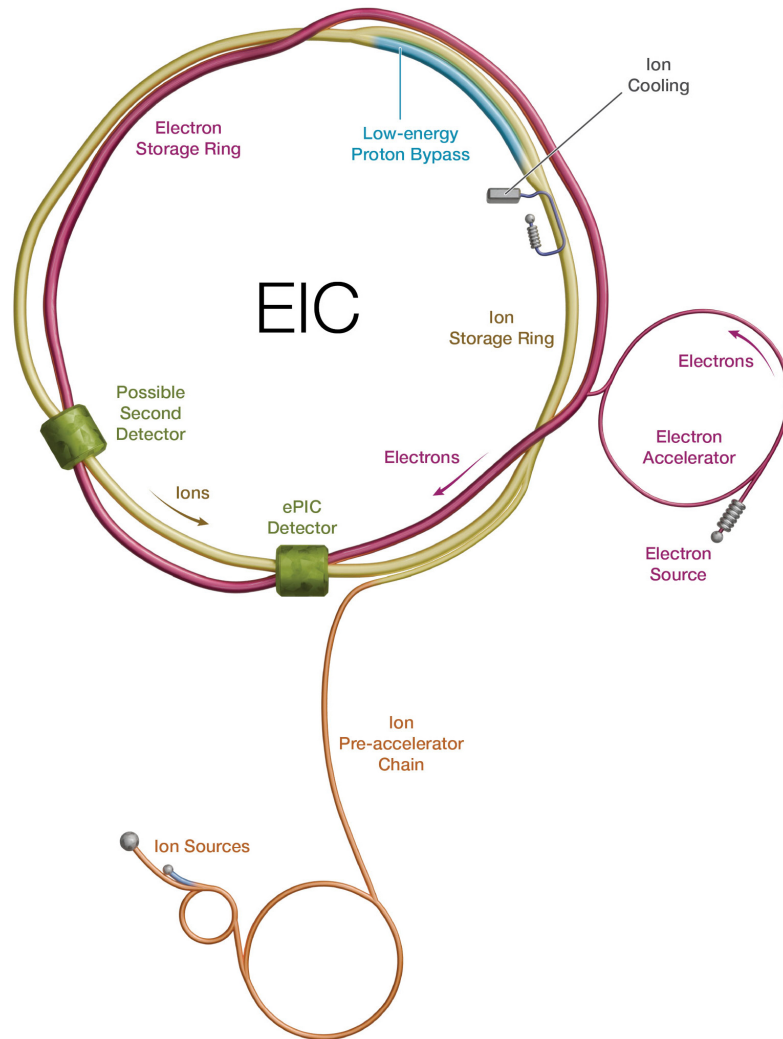
### 1.1.2 L'obiettivo di EIC

L'importanza di EIC per la fisica dei prossimi anni sta nella possibilità di raggiungere elevate energie in collisioni molto precise e controllate, in modo da effettuare misure accurate con l'obiettivo di ampliare le conoscenze attuali sulla struttura della materia. In particolare, all'interno di tale collider sarà possibile penetrare ed esplorare la struttura dei nuclei atomici e dei loro elementi costituenti, mediante fasci di elettroni ad elevatissima energia in grado di espellere **quark** e **gluoni** (le particelle costituenti la materia a livello subnucleare) dal loro confinamento all'interno dei nucleoni.

I quark sono dotati di massa e sono confinati all'interno degli **adroni** per via della **forza nucleare forte**. Infatti il **protone**, così come il **neutrone**, è un barione in quanto costituito da tre quark, e insieme sono gli elementi costituenti della materia stabile ordinaria. Nel **Modello Standard**<sup>2</sup> sono presenti 6 quark (e i corrispettivi antiquark), come mostrato in **Figura 1.3**. I quark, grazie alla loro **carica di colore**, prendono parte all'interazione forte attraverso lo scambio di gluoni.

<sup>2</sup>Il Modello Standard della fisica delle particelle è una teoria fisica che descrive tre delle quattro interazioni fondamentali della natura (interazione elettromagnetica, interazione nucleare debole, interazione nucleare forte), e al suo interno sono presenti le particelle elementari nella loro suddivisione tra fermioni (tra le quali i quark e i leptoni, con le corrispondenti antiparticelle) e bosoni (cioè i mediatori delle interazioni: il fotone, i bosoni carichi  $W^+$  e  $W^-$ , il bosone neutro  $Z$ , i gluoni e il bosone di Higgs).





**Figura 1.2:** Schema dell'Electron-Ion Collider. Al centro dell'immagine è possibile notare la posizione che avrà il rivelatore ePIC all'interno di EIC. [27]

I gluoni sono invece **bosoni**, non massivi, e sono i mediatori della forza nucleare forte. Gluoni e quark, entrambi invisibili e portatori di carica di colore, formano insieme i partoni, che sono i blocchi fondamentali costituenti gli adroni. L'interazione forte, generata dalle cariche di colore, è la più elevata in natura e mantiene legati i gluoni e i quark.

## Modello Standard delle Particelle Elementari

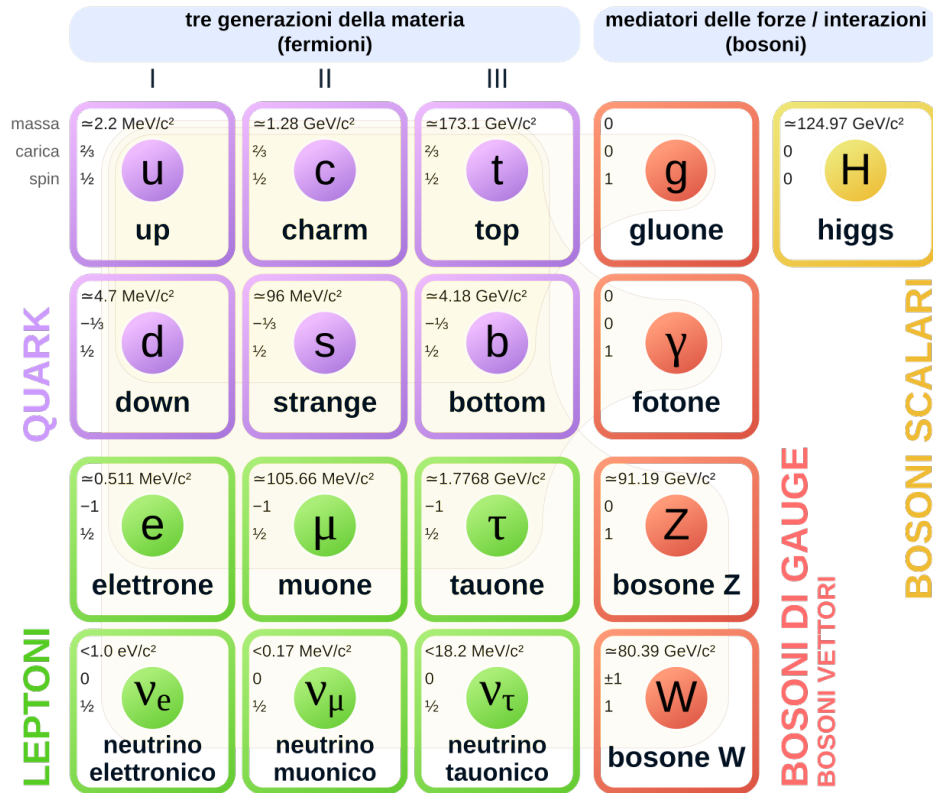


Figura 1.3: Schema delle particelle elementari del Modello Standard. [28]

Pur essendo privi di massa, i gluoni, interagendo con i quark attraverso la forza forte, generano la quasi totalità della massa nucleare, sotto forma di energia. Per capire il meccanismo che origina, attraverso l'energia dell'interazione tra quark e gluoni, la massa nucleare, è necessario studiare il **plasma di quark e gluoni**<sup>3</sup>.

In virtù delle nuove capacità dell'Electron-Ion Collider si cercherà di ottenere risposte riguardo a molteplici aspetti che sono oggetto di studio della Cromodinamica Quantistica<sup>4</sup>:

<sup>3</sup>Il *Quark-Gluon Plasma* (QGP) è un particolare stato della materia, con elevatissime temperature e densità, nel quale i quark non sono confinati a coppie o a gruppi con altri quark o antiquark, ma sono liberi insieme ai gluoni all'interno del plasma. All'inizio della storia dell'Universo, entro qualche decina di  $\mu s$  dal Big Bang, erano presenti tali condizioni, che possono anche essere ricreate artificialmente nei grandi acceleratori. Per ottenere il QGP è necessario far scontrare atomi pesanti ad alte energie: ciò è realizzabile usando fasci a velocità relativistiche all'interno di un collider di particelle come EIC.

<sup>4</sup>La *Quantum Chromodynamics* (QCD) è una teoria quantistica di campo sviluppata tra gli anni '50 e '70 del secolo scorso. È parte del Modello Standard e descrive l'interazione tra quark mediante forza forte e cariche di colore

- le **interazioni** tra **quark** e **gluoni**;
- la **natura** della **forza nucleare forte**;
- il **plasma di quark e gluoni**;
- l'**origine** della **massa** e dello **spin nucleari**.

Infatti EIC sarà anche il primo collider di fasci di elettroni e protoni entrambi polarizzati e allineati in maniera controllata. Ciò renderà possibile comprendere l'effettivo contributo da parte dei quark, dei gluoni e delle interazioni tra loro, al momento angolare intrinseco (spin) dei nucleoni<sup>5</sup>, consentendo per la prima volta di effettuare uno studio tridimensionale della struttura nucleare. Ciò sarà possibile grazie anche al fatto che in EIC si potranno sia variare la polarizzazione dei fasci incidenti, così come la natura e l'energia delle particelle coinvolte. [2]

## 1.2 ePIC: electron-Proton Ion Collider

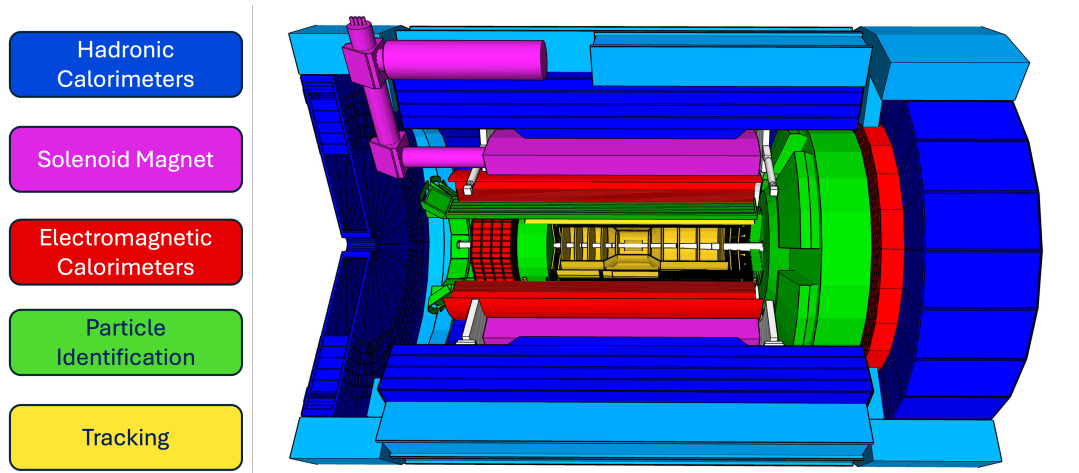
L'**electron-Proton Ion Collider** (ePIC) è un progetto di collaborazione internazionale tra ingegneri e scienziati provenienti da 25 diversi Paesi che ha come obiettivo la costruzione di un nuovo rivelatore di particelle (ePIC detector) allo scopo di studiare i prodotti delle collisioni generate dall'Electron-Ion Collider mediante diverse tecniche di rivelazione.

### 1.2.1 Il rivelatore e le sue componenti

Il rivelatore di particelle dell'esperimento ePIC sarà costituito da una struttura cilindrica, lunga circa 10 *m* e di raggio 3 *m*, posta lungo la linea di fascio del collider. Ad esso saranno collegate altre strumentazioni, portando l'intero apparato a raggiungere qualche decina di metri di lunghezza. Aspetto fondamentale sarà la vicinanza del detector alla linea del fascio e quindi alla regione di interazione: in questo modo sarà possibile rivelare con grande precisione le particelle prodotte dalle interazioni molto vicine al centro del fascio. Per rendere possibile ciò, la maggior parte dei sottosistemi del rivelatore avrà sia una componente cilindrica lungo la direzione del fascio che una circolare agli estremi del cilindro. [3]

---

<sup>5</sup>Attualmente è noto che solo il 30% dello spin protonico è dovuto a quark e antiquark, e un'altra piccola percentuale è dovuta ai gluoni, ma la maggior parte di esso si origina dal moto dei partoni all'interno del nucleone.



**Figura 1.4:** Schema dei sottosistemi del rivelatore ePIC. [29]

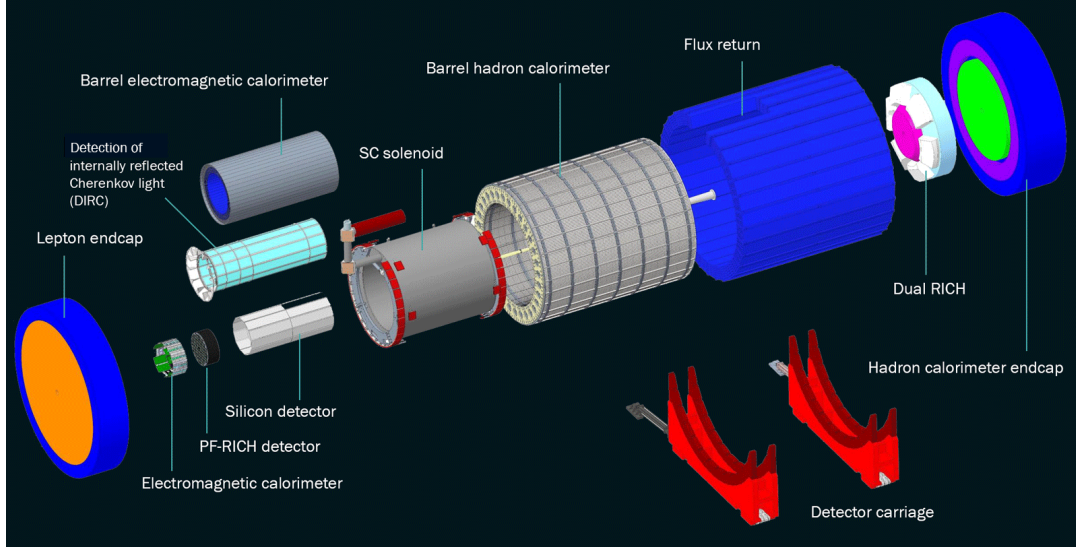
Poiché all'interno dell'Electron-Ion Collider si verificheranno collisioni tra un fascio di elettroni e un fascio di protoni o ioni in direzione opposta ( $e + p$  o  $e + N$ ), l'interazione tra le particelle sarà asimmetrica, e per tale motivo il detector dovrà avere specifiche caratteristiche. In particolare i vari sotto-rivelatori che lo compongono dovranno operare con distribuzioni molto varie di particelle e delle loro energia e quantità di moto (da  $10 \text{ MeV}$  a  $10 \text{ GeV}$ ). Da questa esigenza deriva la separazione del rivelatore in diversi sottosistemi perfettamente integrati tra loro e in grado di svolgere specifiche funzioni (come mostrato in **Figura 1.4**): il sistema per il tracciamento e per la ricostruzione del vertice di interazione, il sistema per l'identificazione delle particelle e il calorimetro per la misura della loro energia. In particolare, il sottosistema per l'identificazione delle particelle (mostrato in verde in **Figura 1.6**), ha il compito di separare gli elettroni dagli adroni (in questo caso protoni, kaoni e pioni) uscenti dalla regione di interazione, utilizzando per tale scopo l'effetto Cherenkov (1.2.2) e altri metodi, come ad esempio il tempo di volo (TOF). [4]

Gli elementi che è previsto comporranno il detector ePIC (in **Figura 1.5** è mostrata una scomposizione interna del rivelatore) sono: [5]

1. un **magnete superconduttore solenoidale**, in grado di generare un campo magnetico di  $1.7 \text{ T}$  per curvare le traiettorie delle particelle prodotte dalle collisioni;
2. un **tracciatore** nelle vicinanze del punto di collisione, composto da rivelatori al silicio **MAPS**<sup>6</sup>;
3. **calorimetri elettromagnetici** per misurare l'energia delle particelle coinvolte;

<sup>6</sup>I *Monolithic Active Pixel Sensors* (MAPS) sono dispositivi che contengono rivelatore ed elettronica di *read-out* all'interno di un'unica struttura, e sono trattati in seguito nella sezione 2.4)

4. **calorimetri adronici** per l'analisi dei *jets*<sup>7</sup> di particelle;
5. un **rivelatore dual-radiator Ring-Imaging Cherenkov dRICH** (esaminato successivamente nella sezione 1.2.3), apparato composto da fotosensori che utilizza la radiazione Cherenkov per l'identificazione delle particelle.



**Figura 1.5:** Composizione degli elementi costituenti il rivelatore ePIC. [30]

## 1.2.2 Effetto Cherenkov

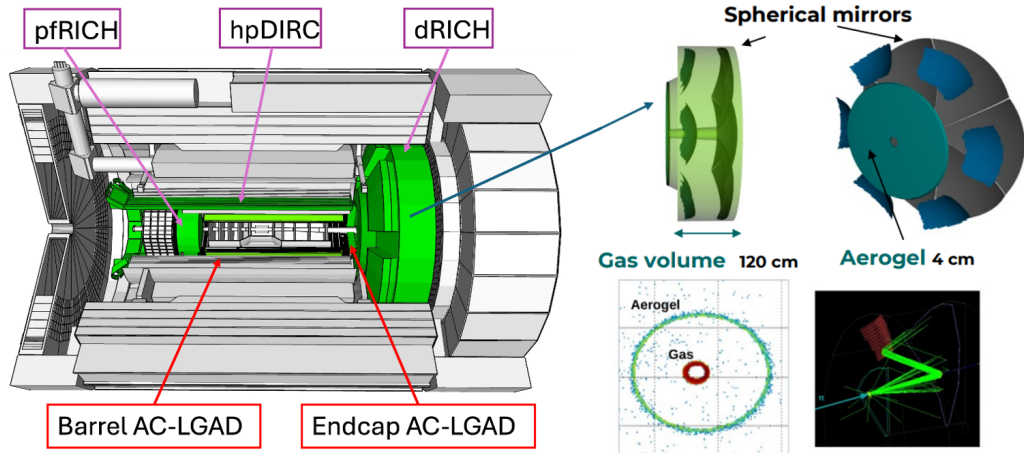
L'effetto Cherenkov si verifica quando un materiale dielettrico è attraversato da particelle cariche che si muovono, nel mezzo, ad una velocità ( $v_p$ ) superiore alla velocità di fase della luce in quel mezzo ( $\frac{c}{n}$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto e  $n$  è l'indice di rifrazione del mezzo). Infatti quando una carica passa attraverso un materiale, le molecole di quest'ultimo polarizzano intorno alla particella eccitandosi. Tornando allo stato fondamentale, tali molecole riemettono energia sotto forma di fotoni che formano un cono di luce (fronte d'onda sferico). Se  $v_p > \frac{c}{n}$  si ha una sovrapposizione costruttiva dei fronti d'onda e quindi l'emissione di radiazione (luce Cherenkov) lungo una direzione caratteristica data dall'angolo  $\theta_c$  rispetto alla direzione della particella. Tale angolo dipende dall'indice di rifrazione  $n$  e dalla velocità della particella ( $\beta = \frac{v_p}{c}$ ):

$$\cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}. \quad (1.2)$$

---

<sup>7</sup>Un *jet* è un fascio di particelle generato dalla diffusione di elettroni ad alta energia su quark all'interno di un nucleo.

Il dRICH di ePIC è un sistema ottico costituito da rivelatori a singolo fotone **SiPM** (*Silicon PhotoMultiplier*, trattati in seguito nella sezione 2.3) in grado di separare i fotoni Cherenkov emessi dalla particella e realizzare un'immagine ad anello delle loro tracce dalla quale è possibile misurare  $\theta_c$ . Da una misura dell'angolo di Cherenkov, conoscendo l'indice di rifrazione dei radiatori del dRICH, si può calcolare  $v_p$  utilizzando l'equazione 1.2, e, nota la quantità di moto della particella, è possibile calcolarne la massa, da cui l'identificazione delle particelle.



**Figura 1.6:** Struttura del rivelatore ePIC con evidenziati in verde i subdetectors dedicati all'identificazione delle particelle. Uno di questi componenti è il dual-radiator RICH, collocato sul lato destro del detector e rappresentato sulla destra della figura. [29]

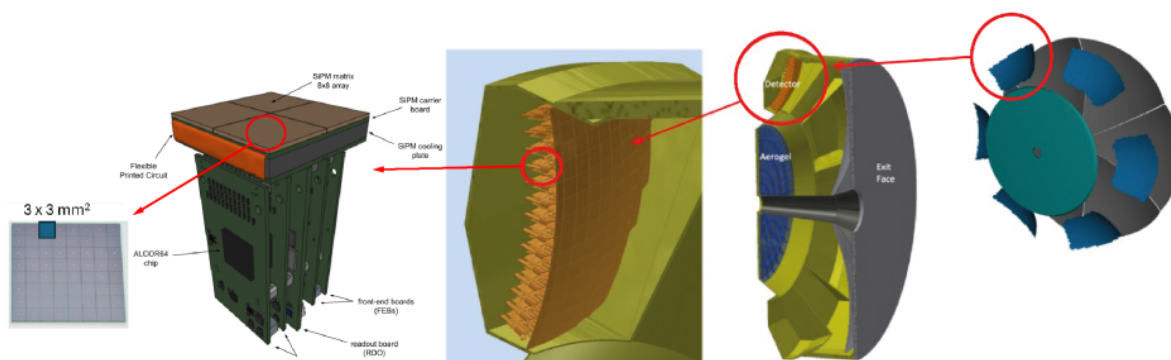
### 1.2.3 ePIC dual-radiator RICH

All'interno del detector ePIC, sulla base posta più vicina al fascio di ioni di EIC, verrà montato anche un rivelatore dual RICH (come riportato in **Figura 1.6**), che sfrutta l'emissione di luce Cherenkov per l'identificazione delle particelle. Tale apparato, consiste in sei sezioni sferiche con uno specchio riflettente e due radiatori ciascuno, contenenti due diversi mezzi: aerogel (indice di rifrazione  $n = 1.02$ ) e gas ( $C_2F_6$ , con indice di rifrazione  $n = 1.008$ ). In ogni settore la radiazione che attraversa i due mezzi converge sul corrispondente specchio e viene riflessa su un piano focale, su cui è presente una serie di fotosensori SiPM (costituiti da pixel di  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ) raccolti in diverse Photon Detector Units (PDU)<sup>8</sup> che formano una superficie di circa  $3 \text{ m}^2$  (un ingradimento di

<sup>8</sup>Nel prototipo realizzato dall'INFN di Bologna sono state posizionate 8 PDU, come si può notare in **Figura 1.8**.

questi elementi è visibile in **Figura 1.7**). I fotoni così rivelati formano un'immagine ad anello da cui è possibile misurare l'angolo di Cherenkov.

L'utilizzo dei fotomoltiplicatori al silicio è dovuto a due importanti vantaggi di questi ultimi relativamente alla radiazione Cherenkov: ottima efficienza di rivelazione di singolo fotone e possibilità di mantenerla anche se soggetti a forti campi magnetici. Tuttavia i fotomoltiplicatori sono facilmente soggetti a falsi conteggi (Dark Count Rate, DCR) dovuti a rumore. [6]



**Figura 1.7:** Componenti del dual-radiator RICH: ingrandimento degli specchi riflettenti e delle PDU con i fotosensori. [31]

### 1.2.4 Il prototipo di dRICH realizzato dall'INFN di Bologna

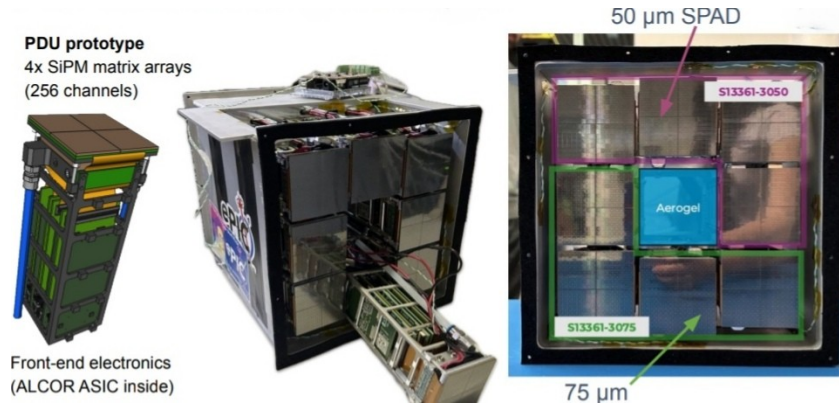
Per conto della collaborazione ePIC, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) della Sezione di Bologna ha realizzato un prototipo di dRICH in collaborazione con altri Istituti. In particolare, il gruppo di Bologna si è occupato del design e della realizzazione di un prototipo, in scala ridotta, del *read-out plane* del dRICH, costruito da matrici di SiPM (in **Figura 1.8** è riportata una fotografia del prototipo). Tale prototipo è stato testato sotto fascio di particelle presso LHC<sup>9</sup> ad un **test beam**<sup>10</sup> a novembre 2025 con l'obiettivo di validarne le funzionalità in termini di capacità di identificazione delle particelle tramite l'anello Cherenkov, e dal punto di vista dell'integrazione dell'elettronica

<sup>9</sup>Il Large Hadron Collider (LHC) è attualmente il più potente e più grande acceleratore di particelle al mondo, si trova al CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) di Ginevra, in un tunnel sotterraneo circolare lungo 27 km al confine tra Svizzera e Francia. LHC è in funzione dal 2009 ed è in grado di raggiungere energie molto elevate (energia del centro di massa fino a 13.7 TeV). Questo grande collider conta anche diversi stadi di pre-accelerazione: i precedenti acceleratori di particelle costruiti al CERN a partire dalla fine degli anni '50 del secolo scorso, tra i quali il Super Proton Synchrotron (SPS).

<sup>10</sup>Un test beam è un esperimento per il test di apparecchiature elettroniche che necessitano specifiche condizioni, come ad esempio che necessitano di un fascio di particelle per essere testati.



di read-out. In particolare il test beam è stato effettuato presso SPS<sup>11</sup> con un fascio di pioni positivi a 180 *GeV*. [7]



**Figura 1.8:** Schema e fotografie delle otto PDU, e dei SiPM di cui sono costituite, utilizzate nel prototipo del dRICH realizzato dall'INFN di Bologna.

Durante lo stesso test beam, parallelamente ai test effettuati sul prototipo di dRICH, è stato anche testato il prototipo di telescopio realizzato per questo lavoro di tesi e descritto nella sezione 3.1, in modo da verificare l'eventuale possibilità di aggiungere al prototipo di dRICH un apparato, costituito da sensori MAPS, per il tracciamento delle particelle.

---

<sup>11</sup>Il Super Proton Synchrotron, operante dal 1976, è l'ultimo stadio di accelerazione di LHC, e consiste in un anello circolare lungo 7 *km* in grado di accelerare protoni (principalmente), antiprotoni, elettroni, positroni e ioni pesanti fino ad energie di 450 *GeV*, che successivamente possono essere iniettati all'interno del Large Hadron Collider



# Capitolo 2

## Aspetti teorici

In questo capitolo verranno trattati gli elementi concettuali sui quali si basa l'esperienza di costruzione del telescopio oggetto di questo lavoro di tesi. La prima parte contiene una descrizione dei raggi cosmici, cioè uno dei possibili target del telescopio. Nelle sezioni successive verranno affrontati argomenti relativi ai sensori al silicio, utilizzati come componenti del telescopio: drogaggio di un semiconduttore, giunzione P-N, diodo, fotomoltiplicatori, SiPM e MAPS.

### 2.1 Raggi cosmici

Il telescopio realizzato per questo progetto di tesi (3.1) è un **tracciatore** di particelle, e può essere utilizzato anche per la rivelazione e tracciamento dei raggi cosmici (particelle provenienti dallo spazio). Infatti, in media, su ogni centimetro quadrato di superficie terrestre incide ogni minuto una particella. Tali particelle cariche e altamente energetiche si muovono a velocità prossime a  $c$ , e possono avere origine galattica o extragalattica: prodotte dal Sole, da altre stelle extrasolari, da novae, supernovae o da quasar. La loro provenienza extraterrestre, da cui il nome di raggi *cosmici*, è stata scoperta all'inizio del secolo scorso. [8]

Tali raggi sono generalmente composti da **protoni**, ma anche da **nuclei atomici**, e da **particelle subatomiche** come elettroni, positroni, **muoni**, fotoni, neutrini. La maggior parte di tali particelle hanno energia compresa tra  $10^7$  e  $10^9$   $eV$ , ma alcune di esse raggiungono anche i  $10^{20}$   $eV$  (ossia 7 ordini di grandezza in più della massima energia ottenibile attualmente presso LHC). Il **flusso** di raggi cosmici è definito come: [9]

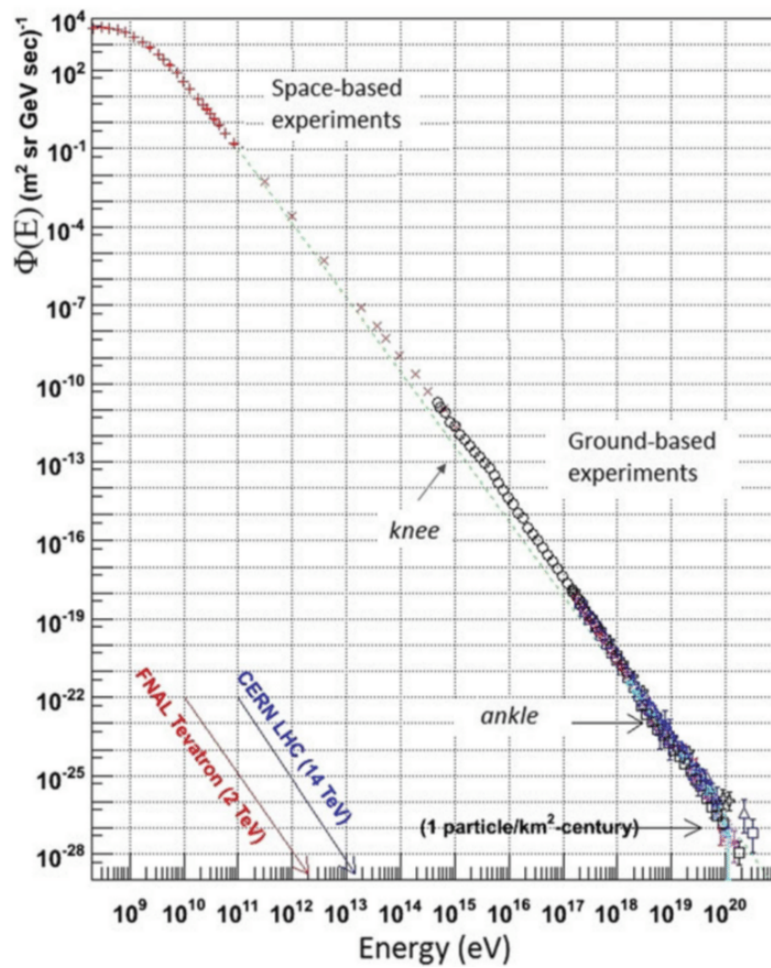
$$\Phi = \frac{dN}{dE \cdot d\Omega \cdot d\Sigma \cdot dt}; \quad (2.1)$$

dove  $N$  è il numero di particelle ed  $E$  la loro energia,  $\Omega$  indica l'angolo solido,  $\Sigma$  indica la superficie, e  $t$  il tempo; e si misura in  $m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot GeV^{-1} \cdot sr^{-1}$ . All'interno dell'intervallo

energetico  $10^8 - 10^{21}$  eV,  $\Phi$  ha un determinato andamento in funzione dell'energia delle particelle: [9]

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}; \quad (2.2)$$

dove con  $N$  si identifica il numero di particelle incidenti, con  $E$  la loro energia. Il parametro adimensionale  $\alpha$  è detto *indice spettrale* e assume valori compresi tra 2.7 e 3. Da tale legge, e dal grafico in **Figura 2.1**, si può notare come ad una maggiore energia delle particelle corrisponde un minore flusso di raggi cosmici, e viceversa.



**Figura 2.1:** Flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia all'interno dell'intervallo  $10^8 - 10^{21}$  eV. In basso a sinistra è presente un confronto con le energie raggiungibili all'interno del Tevatron (attivo fino al 2011) presso il Fermilab (in rosso) e del Large Hadron Collider presso il CERN (in blu). [32]

La carica elettrica di cui sono dotate tali particelle le rende suscettibili, grazie alla forza di Lorentz, ai campi magnetici, tra cui quello terrestre, che è il principale responsabile delle deviazioni delle traiettorie dei raggi cosmici. Due sono i principali effetti: [10]

- **effetto latitudine**, che rende maggiore il flusso di raggi cosmici in prossimità dei poli piuttosto che all'equatore;
- **effetto est-ovest**, che causa un'asimmetria est-ovest dei raggi cosmici rivelati a terra, a causa della preponderanza di particelle cariche positivamente rispetto a quelle negative.

Inoltre le particelle cosmiche subiscono deviazioni anche prima di avvicinarsi alla Terra: a causa del vento solare, dei campi magnetici delle galassie e di esplosioni come le supernovae; rendendo difficile capirne la provenienza.

### 2.1.1 Raggi cosmici primari e secondari



**Figura 2.2:** Rappresentazione artistica di uno sciame di particelle cosmiche secondarie. [33]

Oltre a cambiare direzione più volte, le particelle che compongono i raggi cosmici interagiscono anche con gli atomi e le molecole dell'atmosfera terrestre: si hanno così innumerevoli collisioni, tra le particelle cosmiche e quelle atmosferiche, che generano un elevato numero di particelle, che a loro volta possono decadere o collidere con altre molecole dell'atmosfera e produrre altre particelle (uno sciame cosmico così descritto è rappresentato in **Figura 2.2**). Tale meccanismo a cascata si attiva al momento in cui un raggio cosmico entra nell'atmosfera terrestre e porta alla creazione di una pioggia di

particelle sulla superficie terrestre. Per questo motivo la quasi totalità delle particelle provenienti dal cosmo non raggiunge la superficie terrestre, ma decade o collide producendone altre. Da ciò possiamo suddividere le particelle cosmiche in due componenti: [8]

- **i raggi cosmici primari**, ossia le particelle provenienti dallo spazio che non hanno ancora interagito con gli atomi dell'atmosfera;
- **i raggi cosmici secondari**, detti anche *pioggia* o *shower* di particelle, ossia i prodotti del decadimento dei cosmici primari che hanno interagito con l'atmosfera terrestre.

Per quanto riguarda i cosmici primari, si può definire un importante parametro per valutarne la penetrazione nell'atmosfera terrestre: la **lunghezza di interazione**  $\lambda$ , cioè la distanza media percorsa da una particella cosmica tra due interazioni con atomi d'aria: [11]

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} = \frac{M}{N_A \cdot \rho \cdot \sigma} \approx \frac{A}{N_A \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\pi \cdot r_0^2 \cdot A^{2/3}} = \lambda_N \cdot \frac{A^{1/3}}{\rho}; \quad (2.3)$$

dove  $n = \frac{N_A \cdot \rho}{M}$  è il numero di particelle d'aria per unità di volume, con  $N_A = 6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  il numero di Avogadro,  $\rho$  la densità dell'aria atmosferica,  $M \approx A \text{ g/mol}$  la massa molare dei nuclei che compongono l'aria;  $\sigma = \pi R^2$  è la sezione d'urto dei nuclei degli atomi d'aria, con il raggio nucleare  $R = r_0 \cdot A^{1/3}$  ( $r_0 \approx 1.2 \text{ fm}$ ),  $A$  il numero di massa degli atomi che compongono l'atmosfera; mentre  $\lambda_N$  è la lunghezza di interazione del nucleone (particella cosmica): [11]

$$\lambda_N = \frac{A^{2/3}}{N_A \cdot \sigma} = \frac{1}{N_A \cdot \pi \cdot r_0^2}; \quad (2.4)$$

in aria vale  $\lambda_N \approx 36.7 \text{ g/cm}^2$ . Dunque, utilizzando  $A \approx 14$  per l'azoto e  $\rho \approx 0.2 \text{ kg/m}^3 \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$  come densità media dell'atmosfera a circa  $15 \text{ km}$  di quota, si ottiene una lunghezza di interazione  $\lambda \approx 4 \text{ km}$ . Quindi pressappoco tutti i raggi cosmici primari decadono nell'attraversamento dell'atmosfera e non raggiungono la superficie terrestre. Per rivelare i cosmici primari è quindi necessario utilizzare detector su satelliti orbitanti intorno alla Terra. Data la non elevata superficie disponibile su un satellite, i raggi cosmici primari che vengono rivelati in orbita sono quelli che arrivano in maggiore quantità (flusso più elevato) e quindi meno energetici.

I raggi cosmici secondari vengono invece rivelati generalmente a terra, oppure sottoterra (per evitare interferenze con l'ambiente). Avendo maggiore disponibilità di superficie sul (o sotto il) suolo, è possibile rivelare anche i raggi cosmici che giungono in minore quantità (flusso minore) e che hanno quindi energie più elevate. Sono principalmente muoni, elettroni e fotoni le particelle dei raggi cosmici secondari che raggiungono la superficie terrestre; invece i rivelatori posti in laboratori sotterranei sono in grado di

osservare solo muoni (e neutrini). Ciò è dovuto al fatto che i muoni sono le particelle costituenti la componente *dura* dello sciame di raggi cosmici secondari. Tale componente costituisce circa il 70% dello sciame secondario ed è caratterizzata da un'elevata capacità di penetrazione nella materia solida. I muoni ( $\mu^-$ , e gli antimuoni  $\mu^+$ ) sono leptoni e vengono prodotti nell'alta atmosfera dal decadimento di pioni ( $\pi^+$  e  $\pi^-$ ). I muoni sono in grado di interagire debolmente ed elettromagneticamente, ma non fortemente con i nuclei. Ciò permette loro di attraversare l'atmosfera più facilmente senza decadere: infatti hanno una vita media di  $2.2 \mu s$ , più lunga di altre particelle instabili. L'altra componente (circa il 30%) dei raggi cosmici è detta invece *molle*, e ha una bassa capacità di attraversare la materia. Essa è costituita principalmente da elettroni e fotoni, ma anche protoni, kaoni e altri nuclei.

Nella prima metà del '900 i raggi cosmici hanno avuto un ruolo molto importante nello sviluppo della fisica delle particelle: prima della costruzione degli acceleratori e collisori era proprio tale radiazione cosmica la miglior sorgente esistente di particelle ad elevata energia in grado di urtare le molecole dell'atmosfera terrestre e generare nuova fisica. Infatti alcune particelle e antiparticelle come il positrone e il muone sono state scoperte negli anni '30 proprio grazie allo studio dei raggi cosmici. [8]

## 2.2 Semiconduttori al silicio, giunzioni P-N e diodi

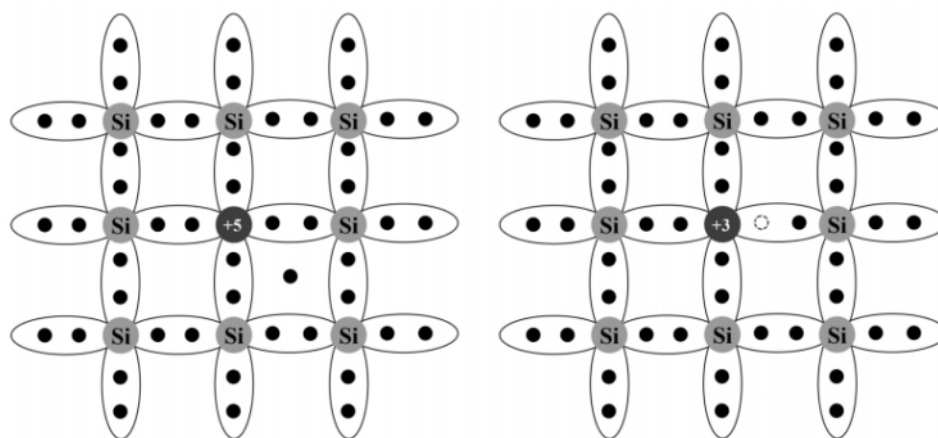
Il **diodo** (una giunzione P-N polarizzata) è l'elemento alla base di innumerevoli dispositivi elettronici, sia analogici che digitali, tra i quali anche i rivelatori come i fotomoltiplicatori. Fondamentale per la realizzazione di questi dispositivi è il **silicio** (Si, numero atomico 14), uno degli elementi più abbondanti della crosta terrestre (in composizione con l'ossigeno), identificato per la prima volta alla fine del XVIII secolo. Il silicio è un elemento del gruppo 14, tetravalente, è un semiconduttore, e ha proprietà intermedie tra quelle dei metalli e dei non-metalli.

### 2.2.1 Drogaggio di un semiconduttore al silicio

Secondo la teoria delle bande, la vicinanza degli atomi all'interno di un reticolo cristallino di silicio permette la sovrapposizione dei livelli energetici atomici e la formazione di due bande continue. La banda superiore, *di conduzione*, è vuota, mentre la banda inferiore, *di valenza*, è piena. Le due bande sono separate da una regione energetica proibita, detta *gap energetico*: nei semiconduttori come il silicio, il gap è relativamente piccolo e può essere attraversato spontaneamente da una frazione di elettroni, se acquisiscono energia termica sufficiente. Il passaggio di elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione genera **coppie elettrone-lacuna** che vanno ad aumentare la conducibilità elettrica del cristallo. Inoltre, non solo attraverso le cariche mobili generate termicamen-

te, ma anche mediante il **drogaggio** (in maniera molto più efficace), si può regolare la conducibilità di un semiconduttore. [12]

Il drogaggio è un processo che consiste nell'inserire all'interno di un semiconduttore puro (il reticolo di atomi di silicio ad esempio) delle impurezze chimiche, cioè altri atomi trivalenti o pentavalenti che fungono, rispettivamente, da accettori o donatori di elettroni (come riportato in **Figura 2.3**). Il drogaggio di tipo N si ha quando le impurezze sono atomi donatori: il quinto elettrone di valenza della sostanza dopante non partecipa ad un legame covalente con gli atomi di Si del reticolo, ma, grazie ad una piccolissima quantità di energia (generalmente è sufficiente l'agitazione termica presente a temperatura ambiente), si libera e può essere considerato un *portatore di carica*. In maniera analoga, nel caso del drogaggio di tipo P le impurezze sono atomi accettori: anche in questo caso è sufficiente l'energia presente a temperatura ambiente per liberare un elettrone di valenza da un atomo di silicio del reticolo, che va ad occupare il sito elettronico libero nella sostanza dopante in modo da formare il suo quarto legame covalente con gli atomi di silicio del cristallo. A causa di ciò sarà presente un sito elettronico libero nel reticolo di silicio: una **lacuna**<sup>1</sup>. Dunque in un semiconduttore drogato N (la N sta per *negativo*), dove si ha una concentrazione più elevata di elettroni liberi *donati* che di lacune, i portatori di carica maggioritari sono gli elettroni (e le lacune sono portatori minoritari); viceversa in un semiconduttore di tipo P (la P indica *positivo*) le lacune sono maggioritarie e gli elettroni minoritari. [13]



**Figura 2.3:** Drogaggio di un semiconduttore al silicio: a sinistra della figura l'impurità è un atomo pentavalente donatore di elettroni, a destra invece è un atomo trivalente accettore di elettroni. [34]

<sup>1</sup>Le lacune possono essere considerate come delle *mancanze di elettroni* nel reticolo, e sono quindi anch'esse dei portatori di carica. Per convenzione la carica di una lacuna è positiva, in opposizione alla carica negativa degli elettroni.

### 2.2.2 La giunzione P-N

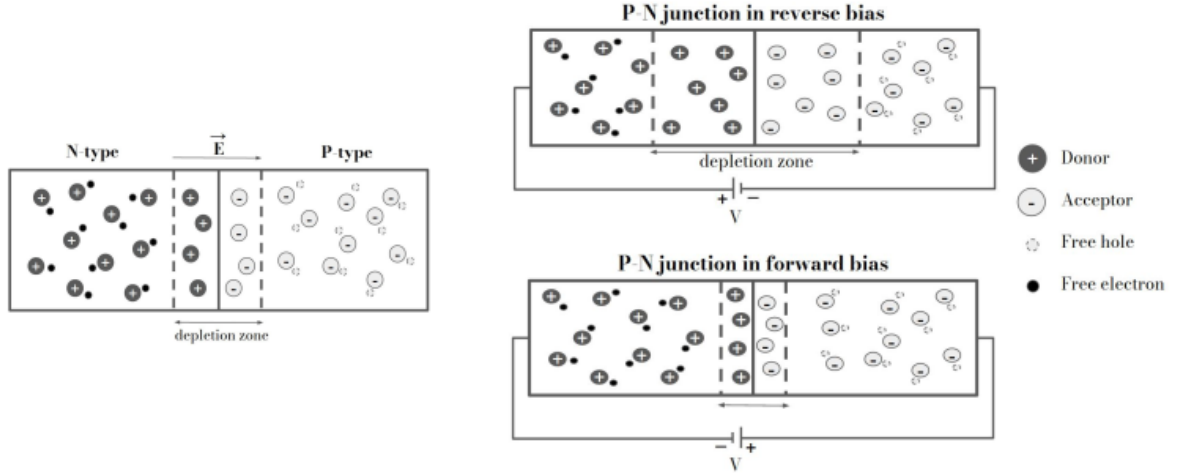
Mettendo a contatto due sezioni di semiconduttore, una drogata P, l'altra con drogaggio di tipo N, si costruisce una **giunzione**. In un intorno della zona che separa le due porzioni di semiconduttore si formano due gradienti di concentrazione (per le lacune e per gli elettroni) in direzione opposta. Ciò spinge i portatori di carica maggioritari, in entrambe le sezioni, a diffondere attraverso la giunzione verso la regione dove sono minoritari: le lacune verso la zona N, gli elettroni verso la zona P. Qui i portatori minoritari si ricombinano con i maggioritari già presenti, e questa sparizione di coppie elettrone-lacuna provoca la creazione di un'area in prossimità della separazione tra la regione P e la regione N, nella quale sono presenti principalmente atomi ionizzati del reticolo (e pochissime cariche mobili libere). La presenza di ioni fissi in questa zona, chiamata **regione di svuotamento** (o *depletion region*), genera un campo elettrico (la barriera di potenziale, o *potenziale di contatto*, della giunzione P-N) diretto dalla regione N (dove, all'interno della regione di svuotamento, è presente un accumulo di cariche positive) alla regione P (accumulo di cariche negative), che blocca il passaggio di cariche da un lato all'altro della giunzione. [14]

### 2.2.3 Il diodo: polarizzare una giunzione

Quando si applica una differenza di potenziale ai capi di una giunzione si ottiene un diodo, che può essere polarizzato direttamente o inversamente, come riportato in **Figura 2.4**.

- **Polarizzazione diretta:** la regione drogata P è connessa al terminale positivo, mentre la regione N al terminale negativo. In questa configurazione i portatori di carica maggioritari sono attratti dal terminale opposto: gli elettroni verso la regione P mentre le lacune verso la regione N. Una volta attraversata la giunzione, le cariche mobili risultano essere minoritarie in quella zona e si ricombinano formando coppie elettrone-lacuna. Ciò fa ridurre il numero di cariche scoperte intorno alla giunzione e provoca quindi un restringimento della regione di svuotamento e una conseguente diminuzione della barriera di potenziale (come si può evincere dalle formule 2.5 e 2.6). Nel caso di polarizzazione diretta, la corrente che attraversa la giunzione è inizialmente piccola poi aumenta esponenzialmente quando si innesca il moto dei portatori maggioritari, ed è quindi maggiore (generalmente è dell'ordine del  $mA$ ) che in polarizzazione inversa: per questo motivo il diodo polarizzato direttamente è considerato un elemento circuitale a soglia che conduce quando la differenza di potenziale ai suoi capi oltrepassa un certo valore.
- **Polarizzazione inversa:** in questa configurazione il terminale positivo è connesso alla regione drogata N, mentre il terminale negativo alla regione P. I portatori maggioritari, in entrambe le sezioni, sono quindi attratti dal terminale della propria

regione, e non attraversano la giunzione, ma si allontanano da essa. Ciò causa un aumento del numero di cariche scoperte intorno alla separazione tra le due regioni: questo si traduce in un allargamento della regione di svuotamento e in un aumento del campo elettrico e della barriera di potenziale della giunzione (come si può evincere dalle formule 2.5 e 2.6). In polarizzazione inversa sono quindi le cariche mobili minoritarie ad attraversare la separazione perché attratte dal terminale opposto: lacune che passano dalla regione N alla regione P ed elettroni che si muovono da P ad N. La corrente che scorre attraverso la giunzione in questa configurazione è quindi piuttosto bassa (dell'ordine del  $nA$  per diodi al silicio) ed è chiamata **corrente inversa di saturazione** (solitamente indicata con  $I_0$ ). Perciò nel caso di polarizzazione inversa il diodo si comporta come una resistenza molto elevata ed è considerato un elemento circuitale che blocca il passaggio di corrente.



**Figura 2.4:** Polarizzazione di una giunzione P-N. In alto nella figura è visibile l'allargamento della *depletion region* in caso di polarizzazione inversa, mentre in basso il restringimento dovuto alla polarizzazione diretta.

In una giunzione la **larghezza**  $W$  della regione di svuotamento corrisponde a: [14]

$$W = W_P + W_N = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot V}; \quad (2.5)$$

dove  $W_P$  e  $W_N$  corrispondono alla semi-larghezza della *depletion region* rispettivamente nella regione P e nella regione N,  $\epsilon$  è la costante dielettrica assoluta del semiconduttore,  $q$  l'unità di carica elementare,  $N_A$  e  $N_D$  sono le concentrazioni di atomi, rispettivamente accettori e donatori, con i quali si è drogato il semiconduttore, e  $V$  la differenza di potenziale esterna applicata ai capi del diodo. Generalmente in un diodo si ha una



concentrazione di atomi accettori almeno di un ordine di grandezza superiore alla concentrazione dei donatori ( $N_A \gg N_D$ ), in tal caso la formula 2.5 può essere approssimata: [14]

$$W \approx W_N \approx \sqrt{\frac{2\epsilon V}{qN_D}} = \sqrt{2\epsilon V \rho \mu_e}; \quad (2.6)$$

dove  $\rho$  corrisponde alla resistività del semiconduttore e  $\mu_e$  alla mobilità degli elettroni. Dalle formule 2.5 e 2.6 è possibile osservare che la larghezza della regione di svuotamento e la tensione ai capi del diodo (cioè l'altezza della barriera di potenziale) sono legate da una legge di proporzionalità quadratica.

La legge che descrive l'andamento della corrente in un diodo in funzione della differenza di potenziale applicata ai suoi capi (anche detta **caratteristica I-V**, rappresentata in **Figura 2.5**) è l'equazione di Shockley, o equazione del diodo: [14]

$$I = I_0 \cdot (e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1); \quad (2.7)$$

dove  $I$  e  $V$  sono la corrente che attraversa la giunzione e la differenza di potenziale applicata ai suoi capi,  $I_0$  è la corrente inversa di saturazione,  $\eta$  è un numero adimensionale detto *fattore di idealità* (per un diodo al silicio  $1 \leq \eta \leq 2$ ) e  $V_T = \frac{K \cdot T}{q} \approx 25 - 26 mV$  è l'equivalente in Volt della temperatura, con  $K$  la costante di Boltzmann,  $T$  la temperatura in kelvin, e  $q$  l'unità di carica elementare. Tale equazione si ottiene dalle espressioni delle correnti di diffusione dei minoritari all'interno di un diodo in condizioni di *low level injection*<sup>2</sup>: [15]

$$I_{PN}^{diff}(x=0) = \frac{q \cdot A \cdot D_P}{L_P} \cdot P'_N(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_P}} = \frac{q \cdot A \cdot D_P}{L_P} \cdot P_{N_0} \cdot (e^{\frac{V}{V_T}} - 1); \quad (2.8)$$

$$I_{NP}^{diff}(x=0) = \frac{q \cdot A \cdot D_N}{L_N} \cdot N'_P(0) \cdot e^{-\frac{x}{L_N}} = \frac{q \cdot A \cdot D_N}{L_N} \cdot N_{P_0} \cdot (e^{\frac{V}{V_T}} - 1). \quad (2.9)$$

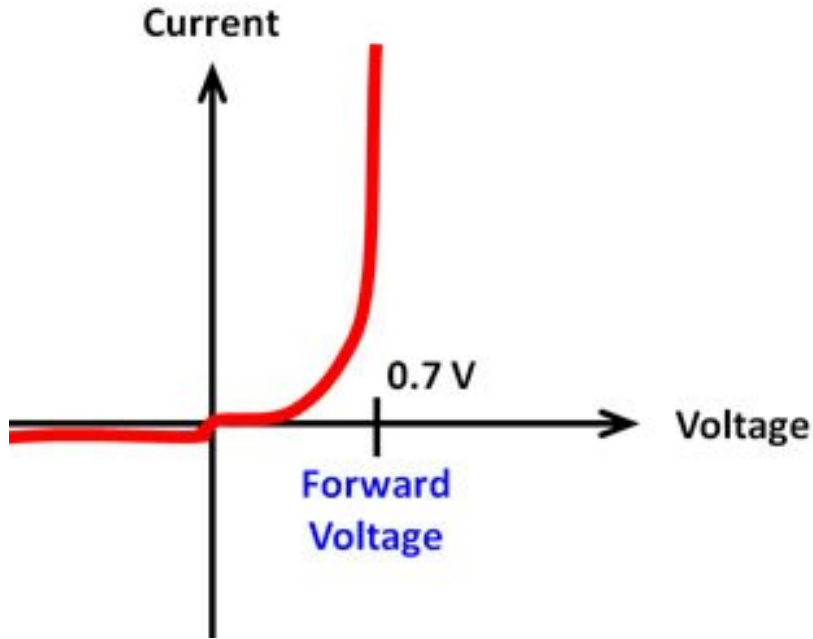
Nella prima delle due equazioni (2.8)  $I_{PN}^{diff}(x=0)$  indica la corrente minoritaria delle lacune dalla regione P alla regione N, nel punto in cui esse hanno appena attraversato la giunzione ( $x=0$ );  $q$  è l'unità di carica elementare;  $A$  è la superficie;  $D_P$  e  $L_P$  sono rispettivamente la costante di diffusione e la lunghezza di diffusione delle lacune;  $P'_N(0) = P_N(0) - P_{N_0}$  è l'aumento di lacune nella regione N rispetto all'istante iniziale, con  $P_N(0)$  la concentrazione delle lacune minoritarie nella giunzione ( $x=0$ ) e  $P_{N_0}$  la concentrazione iniziale delle lacune nella regione N;  $V$  è la tensione di polarizzazione ai capi del diodo e  $V_T$  l'*equivalente in Volt della temperatura*. Le grandezze nell'equazione 2.9 hanno significato analogo, ma riguardano gli elettroni. Sommando queste due correnti di diffusione si

---

<sup>2</sup>Le condizioni di *low level injection* sono un'approssimazione ideale (valida anche per diversi dispositivi reali) utilizzata per risolvere le equazioni che descrivono il moto dei portatori liberi in un semiconduttore.

ottiene la corrente totale  $I$  dell'equazione del diodo (2.7, dove la *corrente inversa di saturazione* risulta essere: [15]

$$I_0 = \frac{q \cdot A \cdot D_P}{L_P} \cdot P_{N_0} + \frac{q \cdot A \cdot D_N}{L_N} \cdot N_{P_0}. \quad (2.10)$$

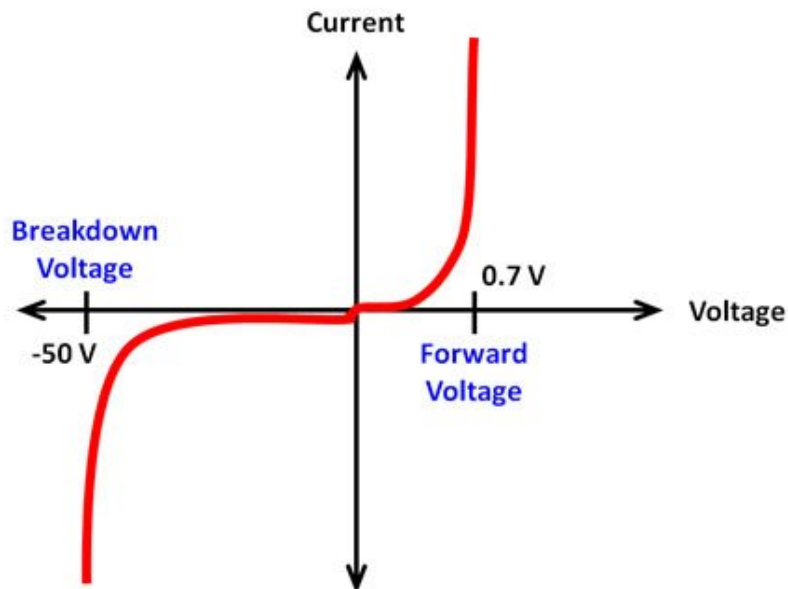


**Figura 2.5:** Caratteristica I-V di un diodo. A circa  $0.7\text{ V}$  si trova il valore di soglia per l'attivazione del diodo. Nel terzo quadrante la corrente rimane pressoché costante:  $I \approx I_0$ . [35]

Come si può osservare in **Figura 2.5** l'origine rappresenta la situazione in cui si trova una giunzione non polarizzata, mentre il primo quadrante è relativo ad un diodo in polarizzazione diretta, e il terzo per un diodo polarizzato inversamente. Essendo il diodo un dispositivo a soglia, in polarizzazione diretta la conduzione comincia solo oltre un certo valore di soglia; prima di tale tensione la corrente rimane molto piccola, confrontabile con la corrente inversa di saturazione, ma positiva. In corrispondenza del punto  $V_\gamma$  sull'asse delle ascisse si ha il valore di soglia (per il Si è nell'intervallo  $600\text{--}800\text{ mV}$ ) oltre il quale il diodo polarizzato direttamente entra in conduzione.

Se si polarizza inversamente una giunzione P-N oltre un certo valore, detto **tensione inversa di *breakdown*** (indicato come  $V_{BD}$ ), avviene un fenomeno di rottura del dielettrico: la corrente inversa dovuta ai portatori di carica minoritari aumenta improvvisamente in valore assoluto mentre la tensione ai capi del diodo si mantiene quasi

costante. Questo comportamento anomalo del diodo è dovuto ad un'elevata accelerazione, da parte del campo elettrico nella regione di svuotamento, delle cariche mobili che attraversano la giunzione. Un elettrone libero molto accelerato raggiunge un valore di energia cinetica sufficiente a causare la rottura dei legami covalenti attraverso gli urti con gli elettroni legati. Per questo motivo si formano altre coppie elettrone-lacuna che a loro volta vengono accelerate dal forte campo elettrico presente e acquistano elevata energia cinetica. Alla stessa maniera le cariche mobili appena prodotte sono in grado di urtare altri elettroni e liberarli dai legami creando altre coppie di portatori di carica. Il risultato è un processo di **moltiplicazione a valanga** delle cariche mobili in grado di provocare un rapido aumento della corrente inversa nella giunzione. [16]



**Figura 2.6:** Caratteristica I-V di un diodo. In particolare è visibile l'andamento della corrente inversa nella regione oltre il valore di breakdown  $V_{BD}$ . [35]

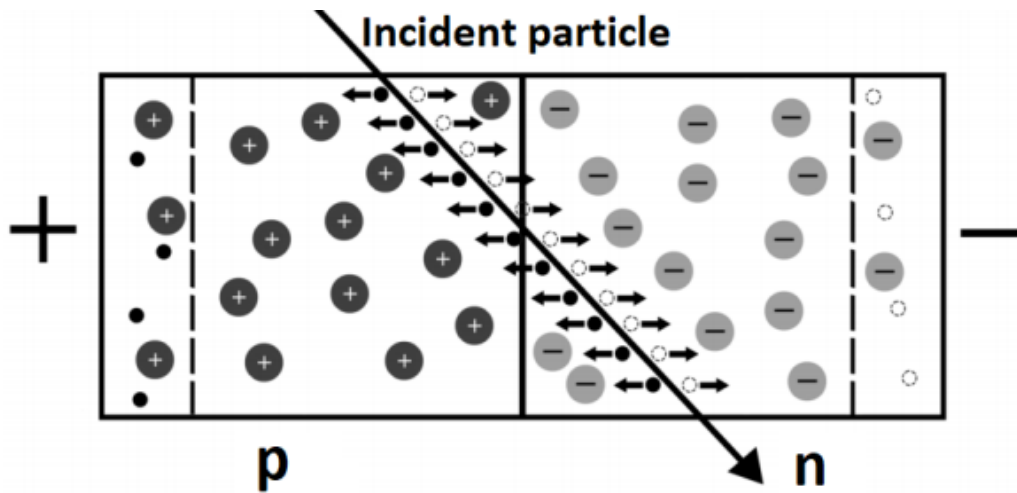
In **Figura 2.6** è riportata la caratteristica I-V di un diodo che comprende anche il valore di tensione inversa di breakdown, oltre il quale si può notare un aumento considerevole, in valore assoluto, della corrente inversa. Il valore della tensione inversa di breakdown dipende dalla temperatura, e per un diodo al silicio a temperatura ambiente è compreso tra i 10 e i 50 V.

Un diodo inoltre può essere utilizzato per la rivelazione di fotoni e altre particelle in dispositivi come fotodiodi e fotomoltiplicatori (trattati nella sezione 2.3).

## 2.3 SiPM: Silicon PhotoMultipliers

### 2.3.1 I fotomoltiplicatori

Un'altra importante applicazione del fotodiodo è la rivelazione, e successiva amplificazione del segnale prodotto, di particelle energetiche mediante fotomoltiplicazione (processo che combina l'effetto fotoelettrico e l'**elettromoltiplicazione**<sup>3</sup>). Questo fenomeno è sfruttato in diversi dispositivi, come ad esempio i fotomoltiplicatori (*PhotoMultiplier Tubes*, PMT) che sono in grado di rilevare livelli di luce estremamente bassi, per amplificare segnali molto deboli. [17]

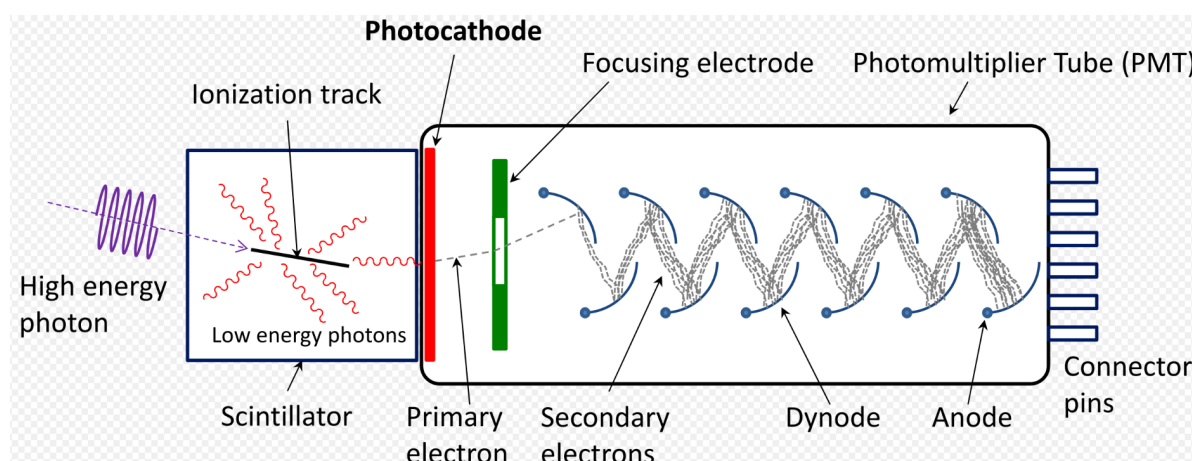


**Figura 2.7:** Passaggio di una particella attraverso una giunzione. La particella cede energia al semiconduttore generando coppie elettrone-lacuna aumentando la concentrazione delle cariche mobili.

Un **fotomoltiplicatore** (PMT) è un dispositivo che assorbe la radiazione di fotoni incidenti producendo un segnale elettrico. I meccanismi che stanno alla base del funzionamento di un fotomoltiplicatore sono l'effetto fotoelettrico e l'emissione secondaria (anche detta *elettromoltiplicazione*). Un PMT è costituito da un tubo a vuoto contenente un catodo (fotocatodo), un anodo e diversi elettrodi chiamati *dinodi*, come illustrato in **Figura 2.8**. I fotoni, con energia maggiore del gap, incidono su una superficie, detta fotocatodo, ricoperta di uno strato che favorisce la cattura fotonica; da ciò, per effetto fotoelettrico, avviene la produzione di una coppia elettrone-lacuna e l'emissione di fotoelettroni che vengono accelerati verso una zona del dispositivo in cui sono presenti numerosi elettrodi disposti a cascata, i dinodi. Qui gli elettroni energetici cedono energia

<sup>3</sup>L'*elettromoltiplicazione*, o *emissione secondaria*, è un processo in cui un elettrone energetico primario, accelerato da un campo elettrico, collide con un materiale e provoca l'emissione di elettroni secondari, che vengono a loro volta accelerati e generano ulteriori elettroni in un meccanismo a valanga.

agli elettroni presenti nei dinodi causando un nuovo processo di emissione elettronica. In ogni dinodo avviene un processo di questo tipo che si trasferisce al dinodo successivo provocando un meccanismo a valanga generato da un singolo fotoelettrone iniziale. Per permettere l'accelerazione (e l'incremento di energia cinetica) degli elettroni prodotti tra un elettrodo e il successivo, i vari dinodi hanno ognuno un potenziale superiore a quello del precedente. Dopo l'ultimo dinodo, gli elettroni vengono fatti convergere sull'anodo, dal quale viene prodotto il segnale di uscita del fotomoltiplicatore. [17]



**Figura 2.8:** Schematizzazione delle componenti di un fotomoltiplicatore e del percorso compiuto dai fotoelettroni al suo interno. [36]

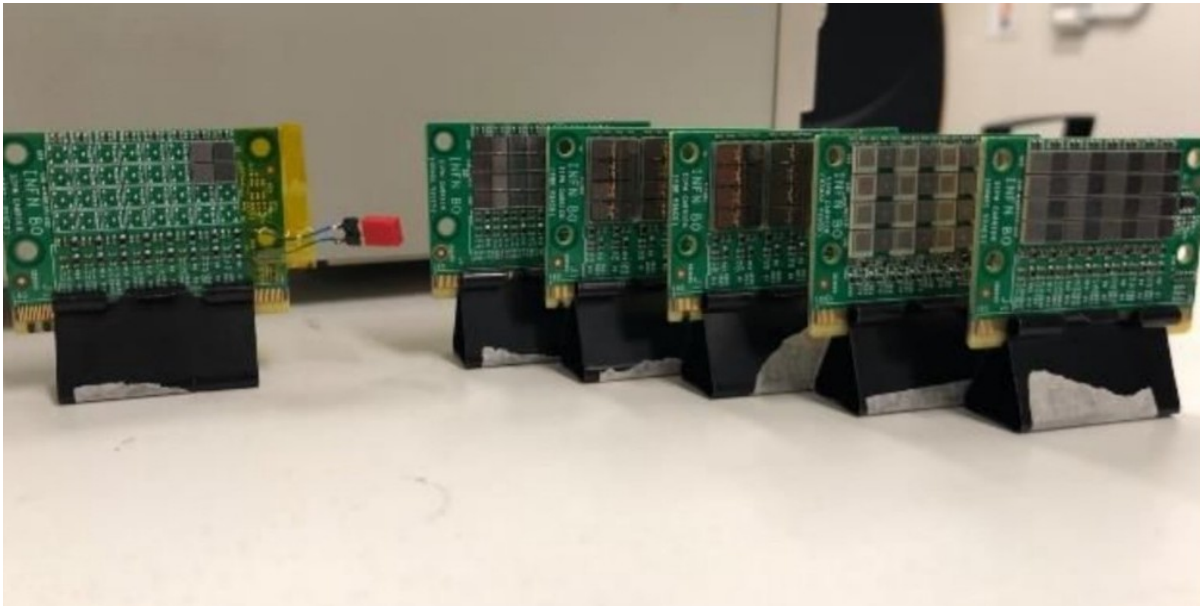
### 2.3.2 I fotomoltiplicatori al silicio

Un **Silicon PhotoMultiplier** (SiPM) è un fotomoltiplicatore (nella **Figura 2.9** è riportata una fotografia dei SiPM da  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  utilizzati per il prototipo di dRICH) caratterizzato da un funzionamento simile a quello dei tradizionali PMT, ma con una diversa struttura. Invece di essere costruiti con tubi a vuoto, i SiPM sono formati da un substrato di silicio sul quale sono presenti diverse matrici contenenti delle serie di microcelle indipendenti. [18]

La cella base è una **Single Photon Avalanche Diode** (SPAD) ed è connessa in parallelo a numerose altre identiche ad essa con l'obiettivo di rivelare eventi di singolo fotone in sequenza. Ogni SPAD, situata su un substrato di silicio, ha il compito di segnalare il passaggio di un fotone in essa oppure no, agendo come un contatore Geiger<sup>4</sup>. Però il meccanismo a valanga di produzione di coppie di cariche mobili non si arresterebbe

<sup>4</sup>Un contatore Geiger è un dispositivo utilizzato per la misura di radiazioni. Consiste in un tubo riempito di gas in cui una singola ionizzazione primaria innesca, grazie all'elevato campo elettrico, una moltiplicazione a valanga indipendente dall'energia depositata, permettendo il conteggio delle particelle ionizzanti che attraversano il tubo.

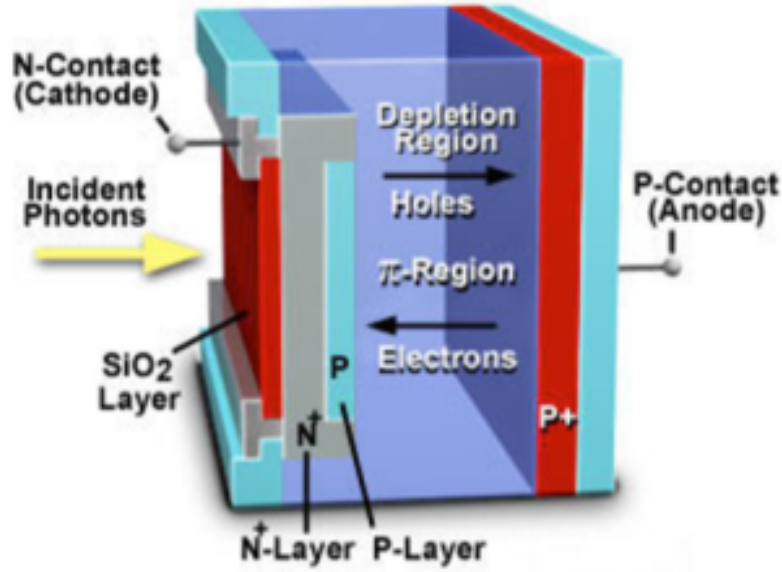
e proseguirebbe indefinitamente a causa della presenza del campo elettrico. Per questo motivo una resistenza di polisilicio, detta di *quenching*, integrata in serie alla SPAD (come mostrato in **Figura 2.11**), introduce una caduta di tensione che arresta la valanga e limita la corrente fotogenerata. Dopo un tempo di recupero (detto *recovery time*,  $\tau \leq 100$  ns) dal momento in cui ha inizio la scarica di Geiger, il diodo della microcella che è stata colpita dal fotone si scarica e la sua tensione torna al valore iniziale. In tale lasso di tempo la SPAD in questione non è operativa, mentre le altre microcelle che compongono il fotomoltiplicatore rimangono attive. [19]



**Figura 2.9:** Fotografia dei SiPM da  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  utilizzati dal gruppo ePIC per studi di irraggiamento.

### 2.3.3 Struttura e funzionamento di una SPAD

Ogni SPAD è una giunzione P-N polarizzata inversamente da una tensione superiore al valore di breakdown (generalmente tra i 20 e i 100 V), ma comunque di molto inferiore alla tensione necessaria ad un PMT tradizionale. La microcella, come riportato in **Figura 2.10**, è costituita da 4 strati di semiconduttore, con drogaggio asimmetrico, compresi tra due elettrodi. Le due regioni più esterne hanno un livello di drogaggio elevato (indicati come  $N^+$  e  $P^+$  rispettivamente). I due strati più interni sono: uno drogato P, che forma la giunzione insieme allo strato  $N^+$ , e l'altro con un basso livello di drogaggio (regione indicata come  $P^-$  oppure  $\pi$ ) e di conseguenza un campo elettrico non elevato.



**Figura 2.10:** Immagine tridimensionale degli strati che compongono una SPAD. In questa immagine la regione centrale con basso livello di drogaggio è indicata con  $\pi$ .

In media un fotone colpisce una singola microcella, dunque il segnale in uscita dal SiPM è dato dalla somma dei segnali provenienti da ognuno di essi. Per questo motivo il guadagno  $G$  del fotomoltiplicatore è direttamente proporzionale alla carica ( $Q$ ) accumulata in ogni SPAD colpita da un fotone. A sua volta la carica su una microcella è calcolata come il prodotto tra la capacità di una SPAD e l'*overvoltage*<sup>5</sup>: [20]

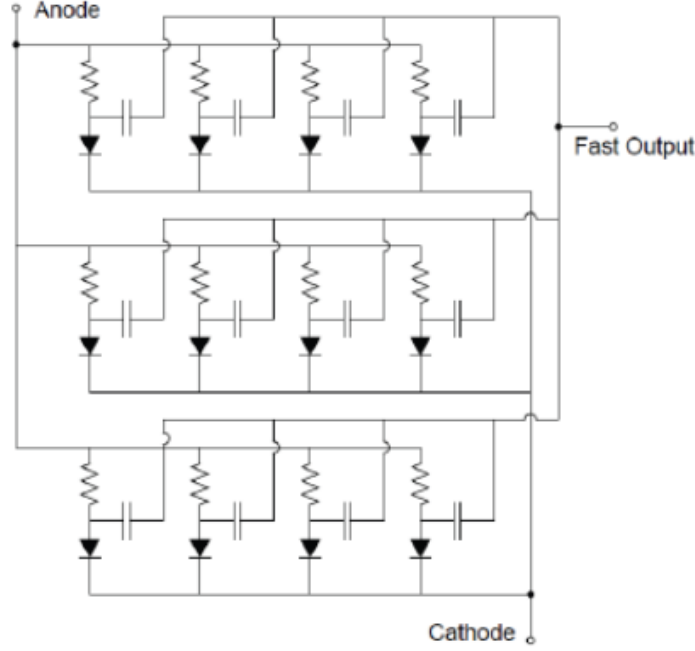
$$G = \frac{Q}{q}; \quad (2.11)$$

$$Q = C \cdot \Delta V; \quad (2.12)$$

dove con  $q$  si indica l'unità di carica dell'elettrone.

Un SiPM è quindi un dispositivo analogico nel quale tutte le microcelle sono lette in parallelo, e grazie a ciò è possibile generare segnali prodotti non solo da un singolo fotone, ma fino anche a 1000 fotoni per  $mm^2$ .

<sup>5</sup>Con *overvoltage* si indica la differenza tra il potenziale applicato ai capi della giunzione e la tensione inversa di breakdown del diodo:  $\Delta V = V - V_{BD}$ .



**Figura 2.11:** Schema circuitale di un SiPM. Si può notare come ogni SPAD è accoppiata ad una resistenza di quenching. [37]

### 2.3.4 Prestazioni e limiti di un SiPM

La sensibilità di un SiPM si misura attraverso la *Photon Detection Efficiency* (PDE), definita come il rapporto tra il numero di fotoni rivelati e quello dei fotoni che hanno colpito il fotomoltiplicatore: [20]

$$PDE = \frac{N_{rivelati}}{N_{incidenti}}. \quad (2.13)$$

La PDE rappresenta la probabilità di innesco di una valanga, in una microcella, da parte di un fotone. Essa si può calcolare come segue: [20]

$$PDE(\lambda, V) = \eta(\lambda) \cdot \epsilon_{BD}(V) \cdot F; \quad (2.14)$$

dove  $\eta(\lambda)$  indica la *quantum efficiency*, cioè il numero di coppie elettrone-lacuna generate da un fotone catturato (di lunghezza d'onda  $\lambda$ ),  $\epsilon_{BD}(V)$  indica la probabilità che una singola carica mobile fotoprodotta sia in grado di innescare il processo a valanga, e  $F$  è il *fill factor*<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup>Il *fill factor* è la percentuale di superficie del SiPM sensibile alla radiazione luminosa. Poiché l'intera superficie del fotomoltiplicatore non è ricoperta di SPAD, ma è necessaria una piccola separazione tra microcelle adiacenti, e dato che ad ogni SPAD è associata una resistenza di quenching (le dimensioni del resistore non possono essere variate), allora maggiore è la superficie di ogni microcella e maggiore è il *fill factor*.



I fotomoltiplicatori al silicio hanno alcune peculiarità che li rendono più vantaggiosi rispetto ai tradizionali PMT sotto diversi aspetti. Oltre alla tensione di funzionamento più bassa in un SiPM che in un PMT, i fotomoltiplicatori classici devono essere schermati magneticamente, a causa del fatto che un campo magnetico esterno (anche quello terrestre) può deviare il percorso degli elettroni al loro interno. I SiPM al contrario sono insensibili al campo magnetico terrestre (tra i 2 e i 7  $\mu T$ ) e a campi magnetici più elevati (fino anche all'ordine di 1 T).

I SiPM hanno però alcuni limiti di applicabilità. A causa dell'agitazione termica che produce un moto casuale delle cariche mobili, alcuni elettroni (detti *termici*) possono dare inizio ad una valanga. In questi casi il segnale prodotto dal fotomoltiplicatore è identico a quello dovuto alla rivelazione di un fotone, ed è detto rumore termico. Questo rumore genera falsi conteggi (**dark counts**, DC) ed è presente anche in assenza completa di luce. Il rumore termico è proporzionale alla tensione di polarizzazione del diodo, alla temperatura e all'area sensibile del SiPM. Un altro fenomeno che prende parte al rumore del fotomoltiplicatore è l'*optical crosstalk* tra microcelle adiacenti. Esso si verifica quando le cariche mobili che prendono parte ad una valanga all'interno di una SPAD innescano una ulteriore valanga in una (o più) microcella vicina. A causa di ciò può accadere che un singolo fotone incidente venga rivelato dal SiPM come due o più fotoni. L'*optical crosstalk* aumenta all'aumentare del *fill factor* e della tensione ai capi del diodo. [16]

## 2.4 MAPS

Un **Monolithic Active Pixel Sensor** (MAPS) è un dispositivo in grado di unire il rivelatore e l'elettronica di read-out all'interno di un'unica struttura in silicio di piccole dimensioni. L'elemento su cui si fonda la struttura di un MAPS è un transistor MOSFET (in particolare CMOS). [21]

### 2.4.1 Transistor MOSFET

Un transistor è un dispositivo costituito da 3 regioni di semiconduttore con drogaggio alternato PNP o NPN (quindi due giunzioni P-N), alle quali sono collegati tre terminali. Per il funzionamento di un transistor sono quindi necessari due circuiti esterni per polarizzare le due giunzioni, scegliendo uno dei tre terminali come terminale comune e gli altri due con il ruolo di ingresso e di uscita, a seconda delle possibili configurazioni. I transistor più utilizzati in elettronica analogica e digitale fanno parte della famiglia dei Field Effect Transistor (FET), e sono detti MOSFET (MOS è un acronimo per i materiali degli strati che compongono la struttura del transistor: Metallo, Ossido e Semiconduttore). Un MOSFET ha tre terminali denominati *gate*, *drain* e *source*, ai quali corrispondono tre possibili configurazioni. A differenza di altri tipi di transistor, il MOSFET è un dispositivo unipolare, ossia la corrente che lo attraversa è dovuta ad un solo

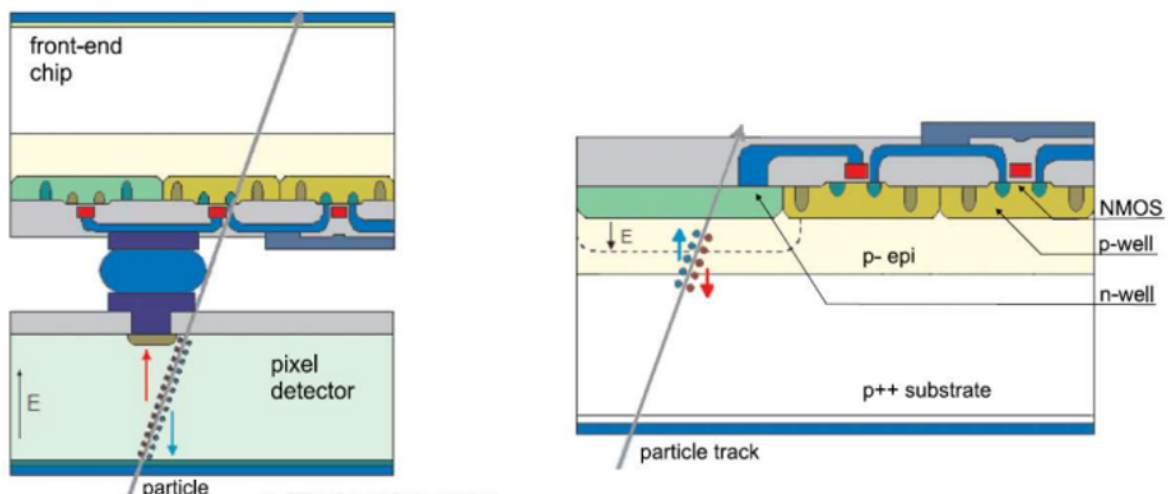
portatore di carica, Per questo motivo i MOSFET si differenziano in due categorie a seconda del portatore di carica coinvolto:

- **NMOS**, cioè un MOSFET a canale N, nel quale la corrente è generata da un flusso di elettroni;
- **PMOS**, o MOSFET a canale P, in cui la corrente è generata dalle lacune.

In un NMOS il substrato, al quale è connesso il terminale comune, è un semiconduttore drogato P, mentre due regioni di semiconduttore con alto livello di drogaggio  $N^+$  sono collegate a due dei tre terminali e sono dette *pozzetti*.

Un'importante applicazione dei transistor NMOS e PMOS per l'elettronica degli ultimi decenni è il transistor CMOS. Esso è costruito attraverso l'accoppiamento in serie di un NMOS con un PMOS, e dunque in un CMOS entrambi i tipi di cariche mobili sono coinvolti.

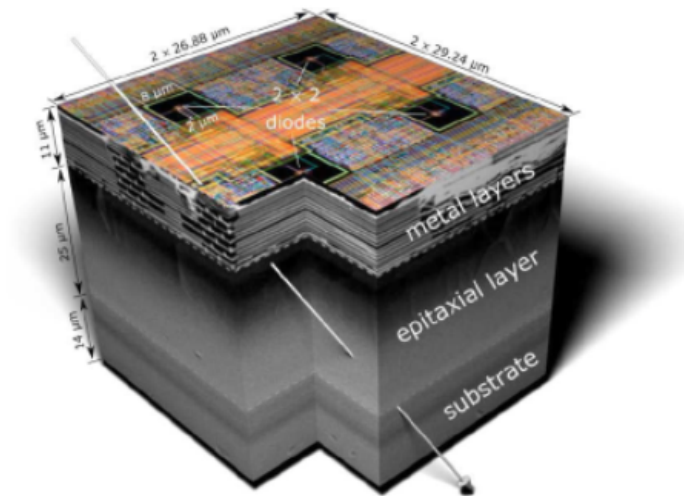
## 2.4.2 Struttura di un MAPS



**Figura 2.12:** Confronto tra un sensore a pixel ibridi (a sinistra nell'immagine) e un MAPS (a destra). [38]

A differenza dei rivelatori a pixel ibridi in cui il sensore e l'apparato di read-out sono montati su differenti substrati e connessi tra loro mediante *bump-bonding*<sup>7</sup>, in un MAPS il substrato è unico e comprende entrambe le componenti, garantendo una dimensione contenuta per l'intero dispositivo (in **Figura 2.12** è riportato un confronto tra i due tipi di sensori).

<sup>7</sup>Il *bump-bonding* è una tecnica per connettere elettricamente i chip attraverso saldature di materiale conduttivo.



**Figura 2.13:** Immagine tridimensionale degli strati che compongono il pixel di un MAPS.

Gli strati che compongono la struttura di un pixel di un MAPS, come mostrato in **Figura 2.13** e **Figura 2.14**, sono i seguenti:

- un **substrato di semiconduttore con un alto livello di drogaggio  $P^+$** ;
- uno **strato epitassiale**<sup>8</sup>, di spessore tra 10 e 100  $\mu m$ , di **semiconduttore drogato  $P^-$** ;
- uno **strato superiore contenente un diodo  $N-well$** <sup>9</sup> (che può essere polarizzato inversamente) e **una coppia di transistor PMOS e NMOS** (che insieme formano un CMOS) di tipo  $P-well$  e  $N-well$ ;
- a volte è presente un **ulteriore strato di semiconduttore drogato  $P$** , detto *deep  $P-well$* , posto al di sotto del  $N-well$  o  $P-well$ , più in profondità nel substrato, e ha la funzione di isolare il transistor dal substrato per limitare il rumore. [21]

### 2.4.3 Funzionamento di un MAPS

In ogni pixel di un MAPS, in maniera indipendente, può incidere una particella energetica, come rappresentato in **Figura 2.14**. Quando ciò si verifica, la particella

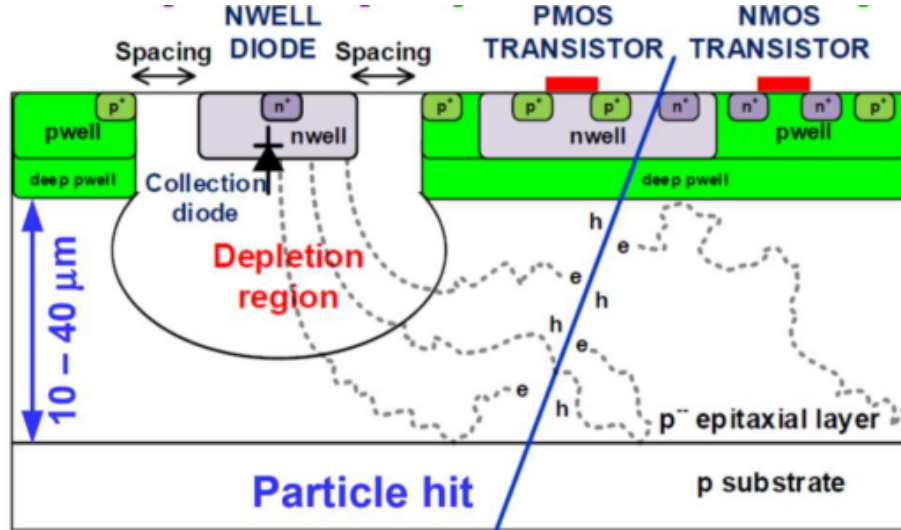
<sup>8</sup>Uno strato epitassiale è un sottile velo di materiale cristallino depositato su un substrato anch'esso cristallino. Il processo di epitassia permette di mantenere nello strato superiore la stessa struttura e purezza presente nel substrato.

<sup>9</sup>Un diodo (o un transistor)  $N-well$  o  $P-well$  contiene una particolare giunzione P-N dove una delle due regioni (la N o la P rispettivamente) è costruita all'interno del substrato dell'altra regione (come un pozzo, *well*). Generalmente tali tipi di giunzioni sono utilizzati nei circuiti integrati.

attraversa lo strato  $P^-$  del sensore perdendo energia durante il tragitto e ionizzando gli atomi del reticolo. Lo strato epitassiale si riempie quindi di coppie elettrone-lacuna generate dal passaggio della particella. Gli elettroni rimangono bloccati in questo strato a causa delle barriere di potenziale generate dalle giunzioni con drogaggio asimmetrico che la regione  $P^-$  forma con il substrato drogato  $P^+$  e con la regione *deep P-well* (o *P-well*). In un MAPS gli elettroni **diffondono** all'interno dello strato epitassiale: alcuni di essi si ricombinano con le lacune, ma la maggior parte è in grado di raggiungere la regione di svuotamento del diodo dove vengono accelerati dal campo elettrico ivi presente e successivamente raccolti. Anche all'interno del *P-well* e del substrato  $P^+$  si generano coppie elettrone-lacuna, e gli elettroni da qui, muovendosi sempre per diffusione termica, convergono verso lo strato epitassiale dove si uniscono a quelli già presenti. In maniera analoga ad un SiPM, in ogni pixel la carica accumulata viene convertita in un segnale di tensione (indicato con  $\Delta V$  nell'equazione 2.15) direttamente proporzionale alla carica totale raccolta ( $Q$ ): [22]

$$\Delta V = \frac{Q}{C}; \quad (2.15)$$

dove  $C$  è la capacità del pixel, che può essere diminuita, per migliorare la qualità del segnale ( $\Delta V$  più elevato), aumentando la differenza di potenziale che polarizza inversamente il diodo nel pixel. Per finire, un ADC (Analog-to-Digital Converter) trasforma il segnale analogico in tensione per ogni pixel in un valore logico: 0 o 1 per indicare l'eventuale passaggio di una particella all'interno del singolo pixel. In questa maniera l'intera catena di acquisizione e di read-out viene svolta velocemente e interamente nel chip.



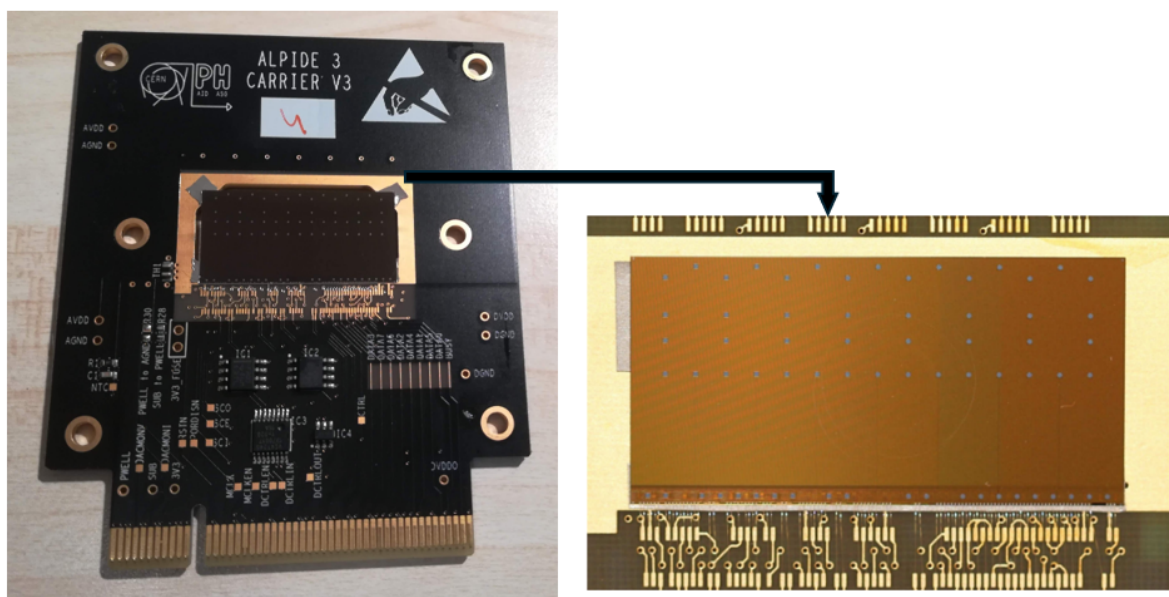
**Figura 2.14:** Schema degli strati che compongono il pixel di un MAPS e rappresentazione del suo funzionamento. [38]

### 2.4.4 Vantaggi dei sensori MAPS

I vantaggi nell'utilizzo di questi chip sono molteplici:

- **basso consumo energetico**, grazie anche alla bassa tensione di lavoro, in polarizzazione inversa, dei sensori di questa tipologia;
- **compattezza**, dovuta alle dimensioni ridotte e alla struttura integrata;
- **segnale di output digitale**, invece che analogico. [22]

I MAPS sono caratterizzati anche da ottime prestazioni in termini di efficienza di tracciamento e risoluzione spaziale. Negli ultimi anni, infatti, sta aumentando il loro utilizzo: ad esempio per la costruzione di tracciatori in alcuni grandi esperimenti di Fisica delle alte energie, tra cui ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*, uno dei più importanti esperimenti di LHC) e lo stesso ePIC, che vedrà impiegato, come spiegato nella sezione 1.2.4, un tracciatore costituito da rivelatori MAPS (una fotografia di uno di questi MAPS ALTAI è riportata in **Figura 2.15**).



**Figura 2.15:** MAPS ALTAI utilizzato per il telescopio. A destra nella figura è presente un ingrandimento del chip. [38]



## Capitolo 3

# Costruzione e test del telescopio MAPS

In questo capitolo verrà presentato l'apparato sperimentale utilizzato per la costruzione e la messa in funzione del telescopio oggetto del lavoro di tesi. Successivamente, verranno presentati i metodi utilizzati per analizzare i dati raccolti dal telescopio. Inoltre, verranno discussi i risultati ottenuti analizzando i dati raccolti durante una campagna di misure con raggi cosmici a Bologna. Infine, verranno presentati e commentati i primi risultati ottenuti utilizzando un telescopio MAPS - formato da quattro piani ALTAI - durante un test beam effettuato dal gruppo ePIC di Bologna a novembre 2025 presso il CERN SPS.

### 3.1 Apparato sperimentale a Bologna

Il telescopio MAPS costruito per questo lavoro di tesi è un dispositivo costituito da due piani rivelatori in grado di tracciare particelle cariche. Tale dispositivo è chiamato anche *beam telescope*, in quanto la principale destinazione d'uso è quella come tracciatore<sup>1</sup> ai test beam.

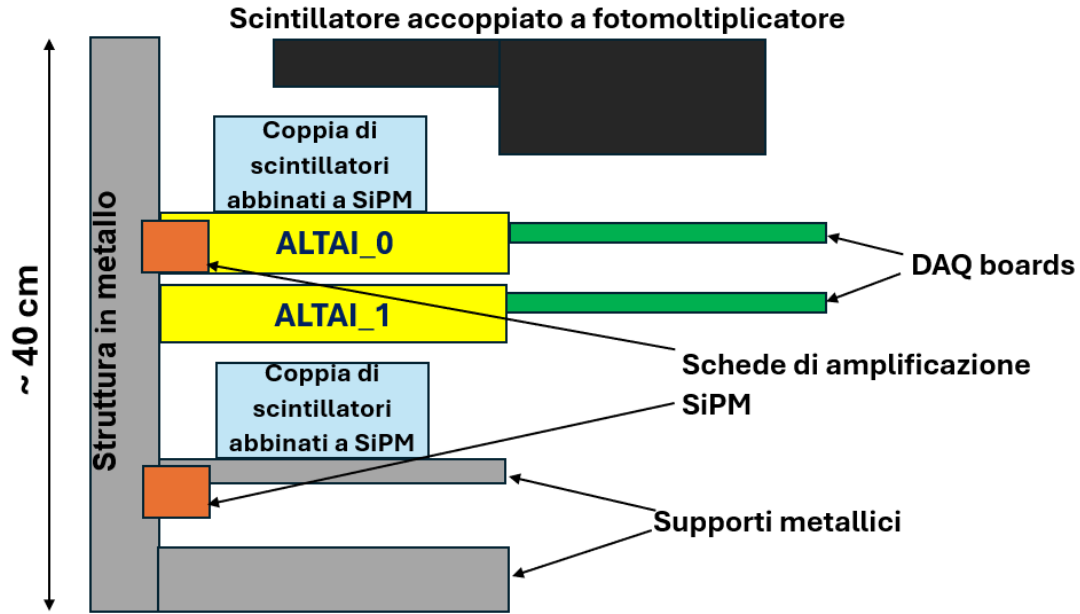
Inizialmente il telescopio, ai fini di testare le funzionalità di base hardware (accensione, comunicazione con la DAQ e il **trigger**<sup>2</sup>) e software (presa e analisi dati), è stato posizionato in verticale, come riportato in **Figura 3.1** e **Figura 3.2**, sorretto da una struttura in metallo alta circa 40 *cm*. Questo ha permesso la rivelazione di raggi cosmici, che sono stati la primaria fonte di dati nella prima fase di studio del dispositivo.

---

<sup>1</sup>Un tracciatore è un rivelatore di particelle, formato da più strati, con il compito di ricostruire la traiettoria delle particelle passanti. Negli ultimi anni il silicio è una delle tecnologie meglio affermate nella costruzione dei tracciatori.

<sup>2</sup>Il segnale di *trigger* è un impulso in tensione utilizzato per comunicare ai sensori l'attivazione dell'acquisizione.

La *setup* allestita presso il laboratorio dell'Università di Bologna per questo lavoro di tesi è schematizzata in **Figura 3.1**, e in **Figura 3.2** ne è riportata una fotografia.



**Figura 3.1:** Schema dell'apparato sperimentale costruito a Bologna. Nell'immagine si possono notare lo scintillatore-PMT (in nero), le due coppie di scintillatori-SiPM (in azzurro), le due schedine ad essi connesse (in arancione), i due MAPS ALTAI (in giallo), le DAQ boards (in verde) ad essi connesse e la struttura metallica su cui sono fissati tutti gli elementi.

Il telescopio è costituito da:

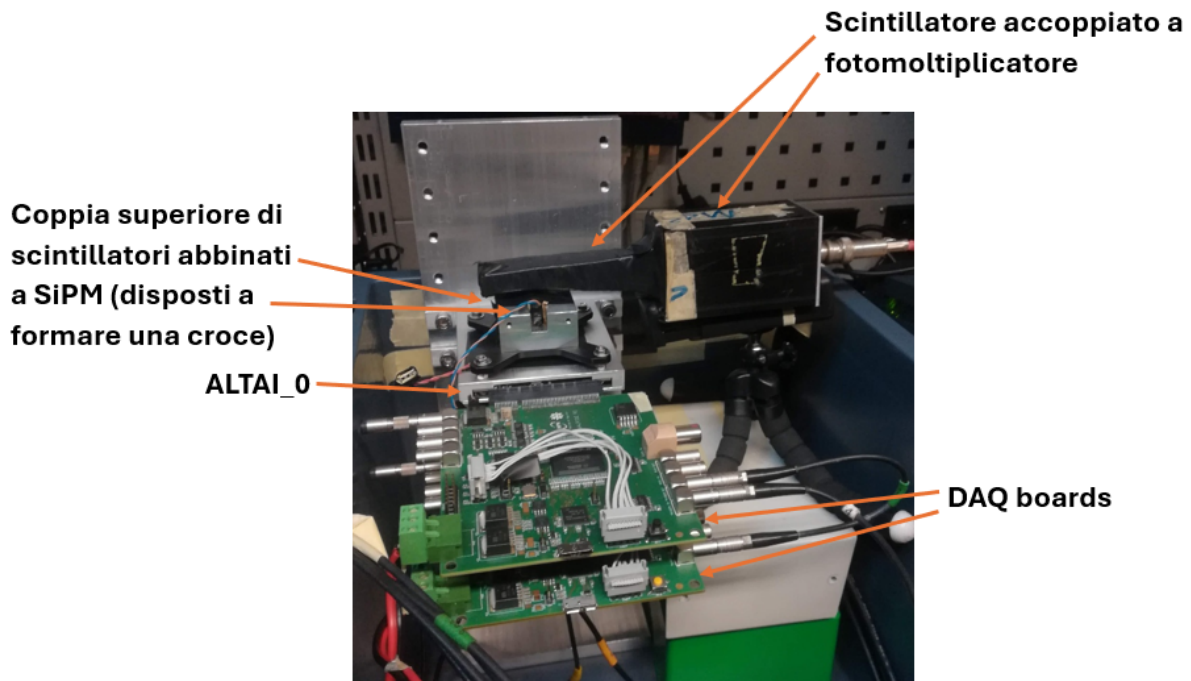
1. un **fotomoltiplicatore accoppiato a scintillatore**<sup>3</sup>, alimentato da un'alta tensione di  $-800\text{ V}$ , e con segnale discriminato in uscita a  $-400\text{ mV}$ ;
2. due coppie di **SiPM abbinati a scintillatori**, alimentati da una tensione inversa di  $-30.5\text{ V}$  con un overvoltage di  $1\text{ V}$ . Siccome i segnali dei SiPM sono analogici,

<sup>3</sup>Uno scintillatore è un rivelatore che sfrutta una proprietà del materiale di cui è costituito, ovvero la *luminescenza*, cioè la capacità di emettere segnali luminosi quando viene colpito da radiazione. In particolare la luminescenza è un fenomeno che si manifesta per trasferimento di energia dalla particella incidente agli elettroni del materiale bersaglio. Gli elettroni, acquistando energia si eccitano, per poi tornare rapidamente al livello fondamentale, emettendo sotto forma di radiazione luminosa (fotoni) l'energia precedentemente assorbita. In un rivelatore a scintillazione, il materiale scintillatore è generalmente accoppiato ad un detector (ad esempio un fotodiodo o un fotomoltiplicatore) per rivelare i fotoni emessi per scintillazione.



sono stati discriminati in segnali logici NIM<sup>4</sup>;

3. due schede fabbricate in laboratorio e chiuse in una gabbia di Faraday (una fotografia è riportata in **Figura 3.3**), utilizzate per l'alimentazione e il read-out dei SiPM, attraverso connettori LEMO;
4. due **sensori ALTAI di tipo MAPS**, da 512 x 1024 pixel, con tensione di polarizzazione inversa a 0 V, il cui valore era assicurato collocando una resistenza del valore 0 Ohm in uno degli ingressi LEMO del circuito di polarizzazione;
5. due **schede DAQ boards** per la programmazione e il read-out dei MAPS. [23] In particolare si è utilizzato gli ingressi LEMO delle DAQ boards per il segnale di trigger;
6. **PC Linux** per interfacciarsi e inviare comandi alle DAQ boards.



**Figura 3.2:** Fotografia dell'apparato sperimentale costruito a Bologna. Nell'immagine si possono notare lo scintillatore-PMT (in nero), la coppia superiore di scintillatori-SiPM (struttura grigia con croci nere al di sotto), ALTAI\_0 (in nero, in un supporto metallico grigio al di sotto della coppia di scintillatori-SiPM), le DAQ boards (in verde) connesse agli ALTAI e la struttura metallica su cui sono fissati tutti gli elementi.

<sup>4</sup>Il *Nuclear Instrumentation Module* (NIM) è uno standard utilizzato in elettronica. La logica NIM utilizza come valore di *true* un segnale a -800 mV e un segnale nullo per il *false*



**Figura 3.3:** Fotografia di una delle due schede collegate alle due coppie di scintillatori-SiPM. A sinistra l'ingresso LEMO per la tensione di polarizzazione, a destra i connettori LEMO per i due segnali di uscita.

I due piani che compongono il telescopio sono due sensori ALTAI (una fotografia è riportata nel capitolo precedente, in **Figura 2.15**, mentre in **Figura 3.4** è mostrato il retro del sensore montato sulla *carrier board*, alloggiata nel suo supporto metallico), ognuno dei quali necessita di una DAQ board (**Figura 3.5**) che monta una FPGA<sup>5</sup> con un software proprietario che viene caricato da PC sulle schede per la programmazione del chip. La DAQ board è costruita in modo da ricevere direttamente il segnale di trigger, gestire la comunicazione con i chip, e trasmettere i dati in uscita dal sensore al PC. I due ALTAI sono stati utilizzati con una tensione di polarizzazione inversa da 0 V<sup>6</sup>, e sono caratterizzati da una superficie attiva rettangolare di area  $1.5 \times 3 \text{ cm}^2$  composta da  $512 \times 1024$  pixel rettangolari di dimensioni  $29.24 \mu\text{m} \times 26.88 \mu\text{m}$ . La distanza tra i due MAPS, fissati attraverso i supporti metallici alla struttura del telescopio, è pari a 2.5 cm.

Come si può osservare in **Figura 3.1** e in **Figura 3.6**, si è scelta una configurazione in cui i due ALTAI sono compresi tra le due coppie di scintillatori, per cercare di prendere dati minimizzando il più possibile la distanza in altezza tra i vari elementi. Considerando una particella che incide sul telescopio in direzione verticale dall'alto verso il basso, essa quindi attraverserebbe in ordine lo scintillatore-PMT, la prima coppia di scintillatori-SiPM, i due sensori ALTAI, e la seconda coppia di scintillatori-SiPM. Dalle fotografie in **Figura 3.6** si può notare come la coppia superiore di scintillatori-SiPM (che sono disposti **perpendicolarmente** l'uno all'altro a formare una **croce**) si trova molto più vicino ai MAPS rispetto alla coppia inferiore. Ciò ha portato ad alcuni accorgimenti descritti nella sezione 3.1.2.

<sup>5</sup>Una FPGA (*Field Programmable Gate Array* è una logica programmabile molto flessibile utilizzata in moltissimi dispositivi elettronici programmabili via software)

<sup>6</sup>Si utilizza una polarizzazione inversa pari a 0 V per il fatto che, per costruzione, nel MAPS è già presente una *depletion region* svuotata.

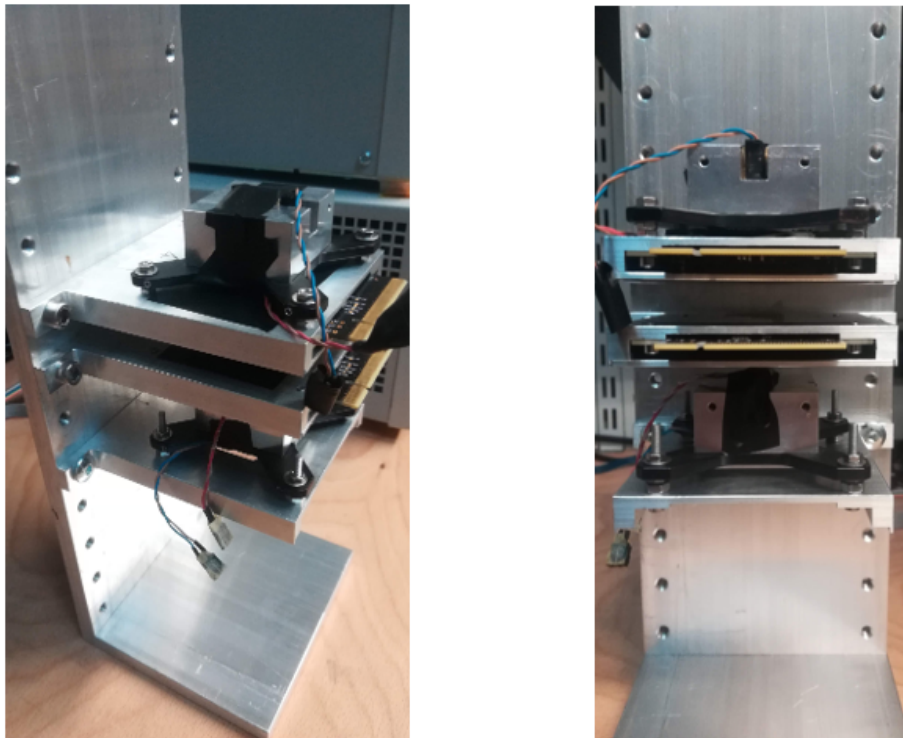


**Figura 3.4:** Fotografia del retro del sensore montato sulla carrier board, alloggiata nel suo supporto metallico mediante il quale è fissata alla struttura del telescopio.



**Figura 3.5:** Fotografia di una delle due DAQ boards utilizzate. Esse contengono una FPGA con un software proprietario che viene caricato da PC sulle schede per la programmazione dei MAPS.

Il segnale di trigger è stato costruito sulla base di un circuito logico con fotomoltiplicatore e scintillatori, e ha la funzione di segnalare ai MAPS il passaggio di una particella e quindi di aprire una finestra temporale di rivelazione per tale particella. Gli ALTAI acquisiscono dati ad una frequenza non superiore a 100 kHz. Di conseguenza la finestra minima utilizzabile per un trigger deve essere di almeno  $10\ \mu s$ , durante i quali ALTAI apre una finestra temporale nella quale legge ogni possibile segnale verificatosi in questo intervallo di tempo.

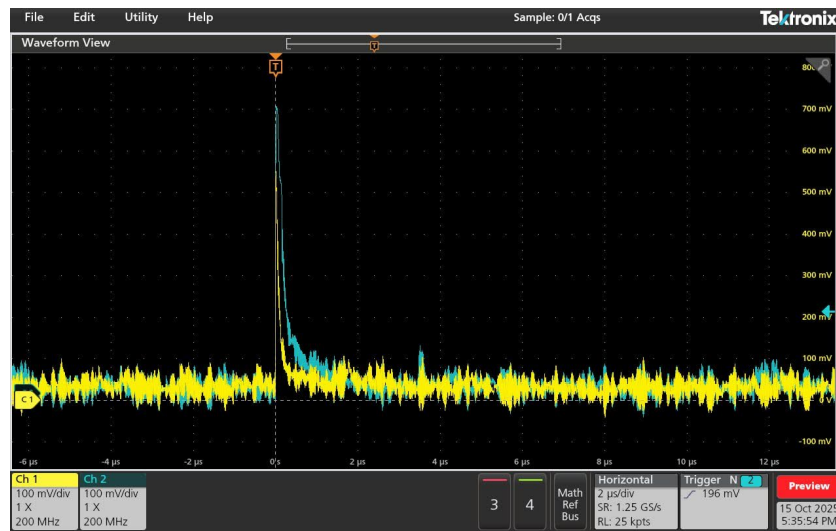


**Figura 3.6:** Fotografie da diverse angolazioni della struttura alla quale sono fissati i due ALTAI e le due coppie di scintillatori-SiPM.

### 3.1.1 Il sistema di trigger

Per la costruzione del sistema di trigger si è deciso di svolgere diversi test per valutare la migliore configurazione. Tale scelta è stata presa con l'obiettivo di cercare un compromesso tra una logica più restrittiva (in grado di distinguere meglio il segnale dal rumore, in particolare nei SiPM, ma ammettendo una statistica più bassa a causa di limiti temporali e del basso rate di raggi cosmici) e una più permissiva (in modo da ottenere una statistica più elevata, ma con una minore capacità di scartare il rumore).

Innanzitutto, dopo aver osservato i segnali analogici di output dei quattro scintillatori-SiPM attraverso l'oscilloscopio come mostrato in **Figura 3.7**, i segnali sono stati mandati in ingresso al modulo *8-Channel Discriminator* del *Crate NIM C.A.E.N* (una breve descrizione è riportata in appendice B.1) per trasformarli in segnali NIM digitali. Da qui i segnali passavano al *8-Channel Fast Amplifier* per essere amplificati, e infine al *8-Channel Low Threshold Discriminator*. Questi quattro segnali NIM di output sono stati osservati attraverso un oscilloscopio e si è notato una maggiore sensibilità al rumore da parte della coppia inferiore di scintillatori.



**Figura 3.7:** Screenshot dello schermo dell'oscilloscopio nel momento in cui viene rivelata una particella cosmica. Nella figura si può notare che il segnale proviene dagli scintillatori  $S_1$  e  $S_2$  connessi ai canali 1 e 2 dell'oscilloscopio (due picchi: uno giallo e uno azzurro). Le fluttuazioni gialle e azzurre nella parte bassa dell'immagine sono dovute a rumore rivelato da entrambi gli scintillatori.

Di conseguenza si è deciso di alzare le soglie (*threshold*) dei due scintillatori inferiori ( $S_3$  e  $S_4$ ) attraverso il *8-Channel Low Threshold Discriminator*. In questa maniera nel caso degli scintillatori superiori ( $S_1$  e  $S_2$ ), solo i segnali, prodotti dai relativi SiPM, al di sopra del valore di  $200\text{ mV}$  venivano convertiti in un *true* del segnale NIM, mentre per i sensori  $S_3$  e  $S_4$  i segnali rispettivamente al di sotto di  $220\text{ mV}$  e  $230\text{ mV}$  venivano scartati considerandoli rumore ambientale, a causa di un *dark count rate* più elevato, anche in termini di ampiezza dei segnali analogici registrati. Il segnale analogico di output dello scintillatore-PMT (che indicheremo con  $S_0$ ) era negativo ed è stato discriminato usando una *threshold* a  $-400\text{ mV}$ . Collegando poi i 5 output NIM al *Quad Scaler* si è potuto conteggiare le particelle cosmiche rivelate dai 4 scintillatori (che indicheremo con  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ ) e dal fotomoltiplicatore, e si è ottenuto un rate medio riportato in **Tabella 3.1** insieme al valore della corrispondente *threshold*.

Il rate molto più elevato nella coppia inferiore di scintillatori è dovuto a rumore, ma non lo si è potuto abbassare alzando ulteriormente le threshold degli scintillatori 3 e 4 a causa di limiti di portata del discriminatore utilizzato. Anche il PMT  $S_0$  ha un rate più alto, ma a differenza dei 4 scintillatori  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$  non è sensibile al rumore dovuto ad interferenze di variazione della rete elettrica del laboratorio.

Sensore	Threshold (mV)	Rate (conteggi al minuto)
$S_0$	-400	$25 \pm 2$
$S_1$	200	$13 \pm 1$
$S_2$	200	$13 \pm 1$
$S_3$	210	$26 \pm 2$
$S_4$	230	$46 \pm 3$

**Tabella 3.1:** Valori delle threshold e dei rate dei 4 scintillatori-SiPM.

### 3.1.2 Acquisizioni svolte a Bologna

Successivamente si sono provate diverse configurazioni per il sistema di trigger utilizzando una *3-Fold Logic Unit*, sia con AND ( $\cap$ ) sia con OR ( $\cup$ ) logici. Utilizzando la logica  $S_1 \cap S_2$  per il segnale di trigger dalla coppia superiore di scintillatori si ottiene un *true* logico solo quando entrambi gli scintillatori  $S_1$  e  $S_2$  hanno rivelato il passaggio di una particella cosmica. Poiché  $S_1$  e  $S_2$  sono disposti perpendicolarmente l'uno all'altro a formare una croce, ciò significa che la particella è passata attraverso la superficie sensibile al centro della croce. La situazione è analoga per la coppia inferiore di scintillatori-SiPM ( $S_3 \cap S_4$ ). Con un OR logico (ad esempio  $S_1 \cup S_2$ ) invece è sufficiente che la particella cosmica sia rivelata da uno solo dei due scintillatori, quindi si ha un *true* anche se la particella ha attraversato un punto della croce diverso dal centro. Oltre alle logiche AND e OR tra i due scintillatori di una coppia, si è conteggiato le particelle anche utilizzando circuiti logici che prendono in considerazione segnali provenienti da tutti gli scintillatori (per un totale di 5), in modo da non trascurare le particelle con traiettorie non perpendicolari al suolo. Tutti questi test sono stati svolti con l'obiettivo di trovare una configurazione per il segnale di trigger in grado di minimizzare il numero di trigger causati dal *dark count*. In **Tabella 3.2** sono riportati i rate dei conteggi secondo le varie logiche.

Da questi test della configurazione del sistema di trigger si è notato un rate stranamente basso relativamente alle logiche nelle quali si ha l'AND del PMT ( $S_0$ ) con uno (o entrambi, in OR o in AND) degli scintillatori della coppia inferiore ( $S_3$ ,  $S_4$ ). Ciò è dovuto principalmente alla distanza relativamente grande tra questi due piani del telescopio, e alla selezione stringente delle tracce.



Sensore	Rate (conteggi al minuto)
$S_1 \cap S_2$	$0.4 \pm 0.2$
$S_3 \cap S_4$	$1.4 \pm 0.4$
$S_1 \cap S_3$	$0.2 \pm 0.1$
$S_2 \cap S_4$	$0.2 \pm 0.1$
$S_1 \cup S_2$	$23 \pm 2$
$S_3 \cup S_4$	$45 \pm 3$
$S_1 \cup S_3$	$27 \pm 2$
$S_2 \cup S_4$	$53 \pm 4$
$(S_1 \cap S_2) \cap (S_3 \cap S_4)$	$0.1 \pm 0.1$
$(S_1 \cup S_2) \cap S_0$	$1.8 \pm 0.4$
$(S_3 \cup S_4) \cap S_0$	$0.08 \pm 0.04$
$(S_1 \cap S_2) \cap S_0$	$0.27 \pm 0.01$
$(S_1 \cup S_3) \cap (S_2 \cup S_4) \cap S_0$	$0.29 \pm 0.01$
$(S_1 \cup S_2) \cap (S_3 \cup S_4) \cap S_0$	$0.1 \pm 0.1$

**Tabella 3.2:** Rate di raggi cosmici rivelati con le varie logiche utilizzate combinando i 4 scintillatori-SiPM e il fotomoltiplicatore.

La fase successiva è consistita nel collegare l'output del sistema di trigger in ingresso agli ALTAI, in modo da iniziare il vero e proprio tracciamento dei raggi cosmici. Per fare ciò si è utilizzato il *NIM-TTL-NIM Adapter* in modo da convertire il segnale NIM di output con la logica scelta, in un segnale TTL<sup>7</sup> positivo a +2.5 V. Successivamente il segnale TTL entrava in un *pulser* (*Aim-TTi TGP110 10 MHz Pulse Generator*), un generatore di funzioni, in *triggered mode*<sup>8</sup> in modo da trasformarlo in un segnale LVTTL<sup>9</sup> positivo da +3.3 V e largo 100 ns, ovvero il segnale con le caratteristiche richieste come trigger dagli ALTAI. Così è stato possibile svolgere diverse acquisizioni. La costruzione di un apparato in grado di trasformare il segnale NIM in TTL e infine in LVTTL è stata di grande importanza per il successivo utilizzo del telescopio al test beam. Infatti al test beam di novembre 2025 il gruppo ePIC ha ricostruito una setup per il telescopio molto simile a quella realizzata a Bologna: in particolare è stato utilizzato lo stesso identico sistema di conversione del segnale NIM-TTL-LVTTL.

Quando il sistema di trigger, con la logica voluta, rivela il passaggio di una particella, il segnale viene convertito a LVTTL tramite il pulser ed entra nelle DAQ boards. Durante

<sup>7</sup>La *Transistor Transistor Logic* è uno standard logico utilizzato in elettronica, principalmente nei circuiti integrati.

<sup>8</sup>In modalità *triggered* ogni volta che al pulser arriva un segnale TTL oltre una certa soglia, esso genera in output un altro segnale del quale si possono selezionare forma d'onda, ampiezza e frequenza.

<sup>9</sup>Il Low Voltage Transistor Transistor Logic (LVTTL) è uno standard utilizzato nei circuiti digitali che funziona a basse tensioni.

l'acquisizione, pilotata dalle DAQ boards tramite un PC Linux, il software - per ogni trigger - controlla se e quali pixel si sono attivati in una finestra di  $10 \mu s$  a seguito del segnale di trigger ricevuto in input dalle DAQ boards. Lo stesso software produce, in *real time* durante l'acquisizione, un file binario in formato *.raw* che contiene le informazioni su tutti i pixel che si sono accesi in corrispondenza di ogni evento, per tutta la durata dell'acquisizione. Tale file di output può essere successivamente analizzato utilizzando il software **Corryvreckan** (una breve spiegazione di tale software è riportata in appendice A.1). [24]

### 3.1.3 Risultati a Bologna

In questa sezione sono riportate le **hitmap**<sup>10</sup> attraverso le quali sono mostrati i risultati delle analisi relative alle acquisizioni di raggi cosmici svolte in laboratorio.

In **Figura 3.8** è riportato il risultato di un'acquisizione preliminare di circa 72 ore svolta rivelando raggi cosmici con il telescopio ALTAI, usando il solo scintillatore di area maggiore (accoppiato al PMT) come trigger. Lo scopo di questa acquisizione era di testare le funzionalità principali del telescopio (accensione dei sensori, ricezione corretta dei trigger, funzionamento della presa dati e produzione corretta del file di output). Data la bassa statistica osservata nelle acquisizioni con raggi cosmici, si è operata la scelta di spostare il fotomoltiplicatore in corrispondenza della metà sinistra dei sensori ALTAI, di modo tale da osservare se vi fosse o meno un trend nella hitmap risultante. In alto nella **Figura 3.8** è riportata la hitmap originale, mentre in basso la hitmap re-binnata. In quest'ultima, grazie al *re-binning*<sup>11</sup>, è possibile osservare più facilmente un accumulo nella porzione sinistra della hitmap, tuttavia non sufficiente per ipotizzare un vero e proprio trend.

Per questa ragione, in **Figura 3.9**, sono riportate le intercette delle tracce ricostruite da Corryvreckan utilizzando i **cluster**<sup>12</sup> individuati sui due ALTAI<sup>13</sup>, nelle quali si può osservare un trend più marcato. Ciò è possibile perché, pur trattandosi di una traccia passante per due soli punti (quindi limitata dal punto di vista di un vero e proprio *tracking*), ciò ha permesso di escludere eventi dovuti a rumore equamente distribuito sulla superficie dei due sensori.

---

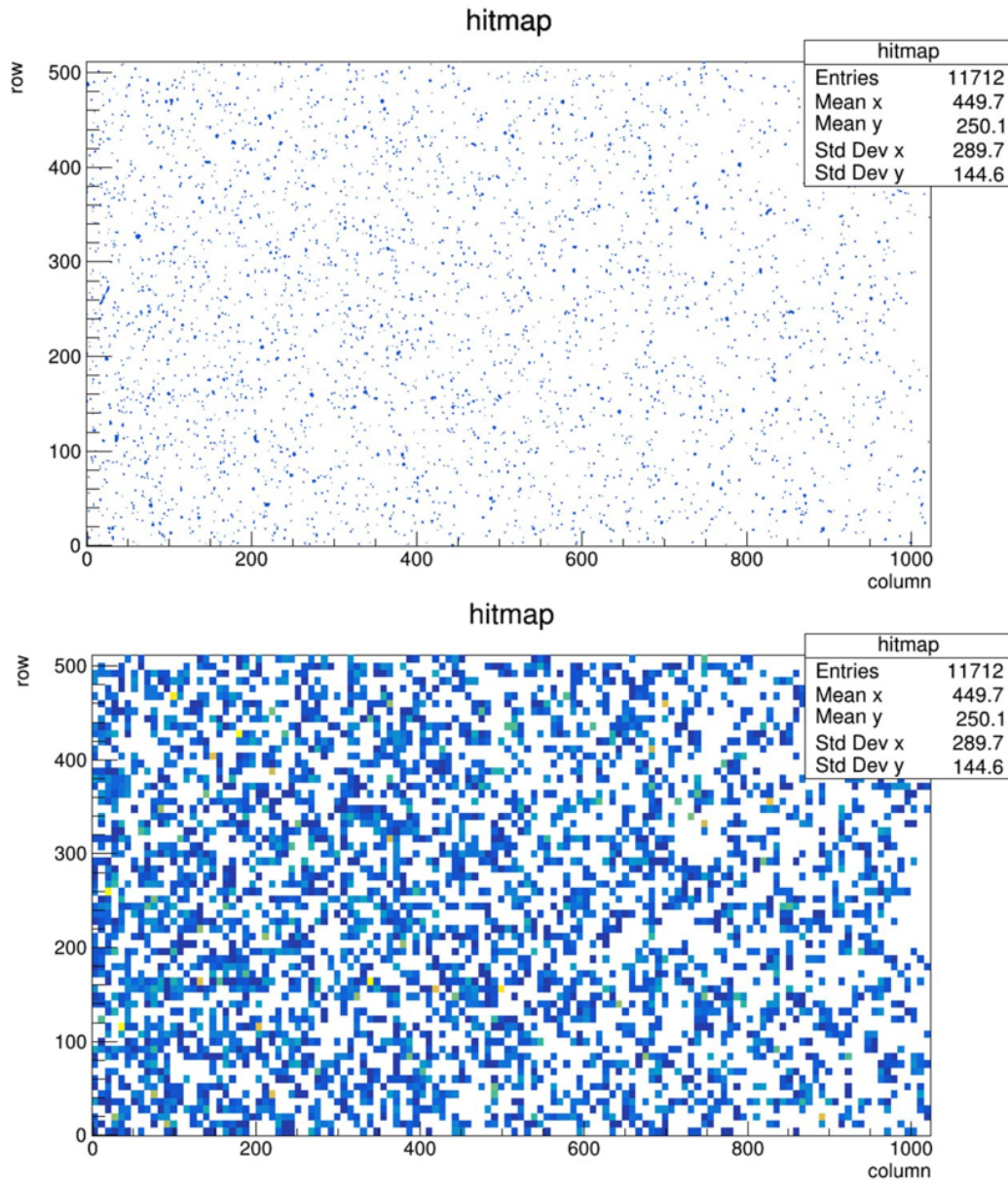
<sup>10</sup>Una *hitmap* è una mappa bidimensionale che mostra il numero di eventi rivelati dai pixel e la posizione dei singoli pixel del detector.

<sup>11</sup>Il *re-binning* è una procedura utilizzata per variare (in questo caso si allarga) l'ampiezza dei bin, cioè l'intervallo di valori attraverso i quali si raggruppano i punti di un istogramma o di una hitmap.

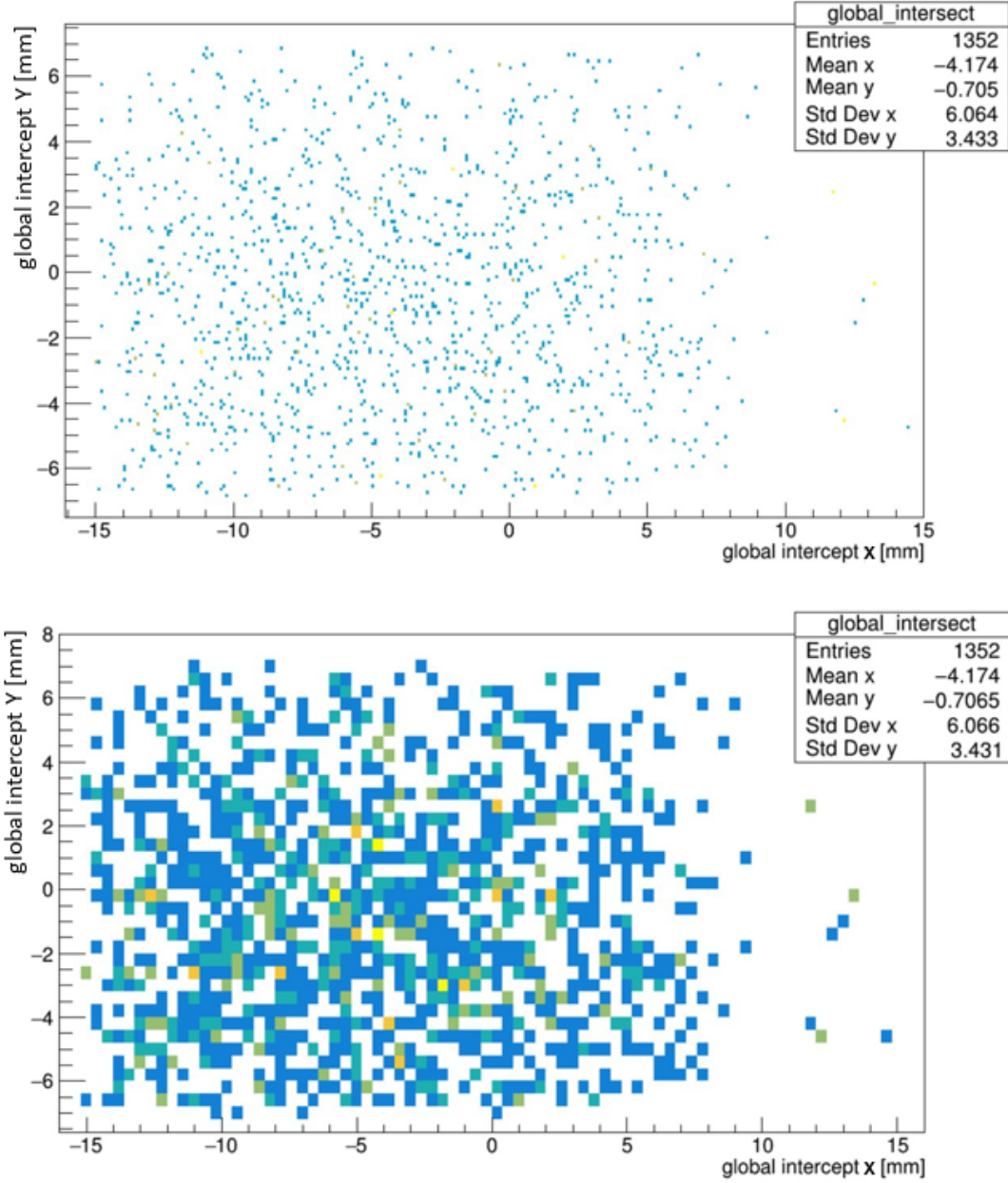
<sup>12</sup>Un *cluster* di pixel è un raggruppamento di pixel vicini che si sono accesi in contemporanea.

<sup>13</sup>Il tracciamento effettuato con 2 soli piani è effettivamente un caso banale, poiché (avendo solo 2 piani) non si ha un controllo sulla rettilinearità delle tracce ricostruite. Nei test svolti al test beam (riportati nella sezione 3.2) invece questo problema non si è presentato, avendo avuto a disposizione 4 ALTAI.





**Figura 3.8:** Confronto tra due plot della stessa hitmap relativa ad ALTAI\_0, ma con un diverso binnaggio in modo da mostrare meglio visivamente i pixel accesi: in alto nella figura la hitmap originale, in basso la hitmap re-binnata.



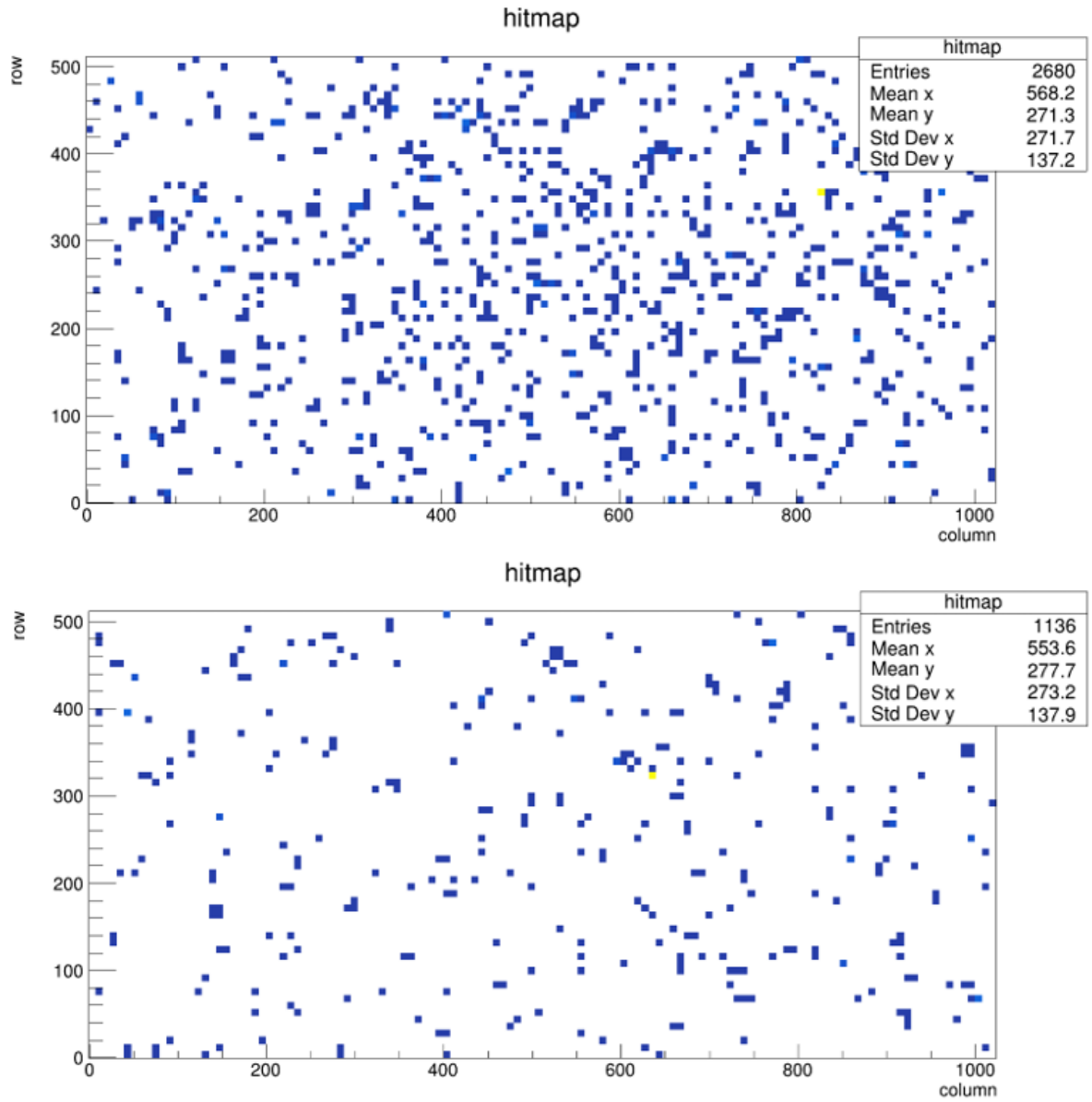
**Figura 3.9:** Confronto tra due plot della stessa hitmap delle intercette delle tracce relativa ad ALTAI\_0, ma con un diverso binnaggio in modo da mostrare meglio visivamente i pixel accesi: in alto nella figura la hitmap originale, in basso la hitmap re-binnata.

Una volta testate le funzionalità di base del telescopio, si è deciso di procedere con altre due acquisizioni, stavolta introducendo nella logica anche gli altri scintillatori ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  e  $S_4$ ) anche alla luce dei risultati ottenuti utilizzando lo *scaler* e riportati in

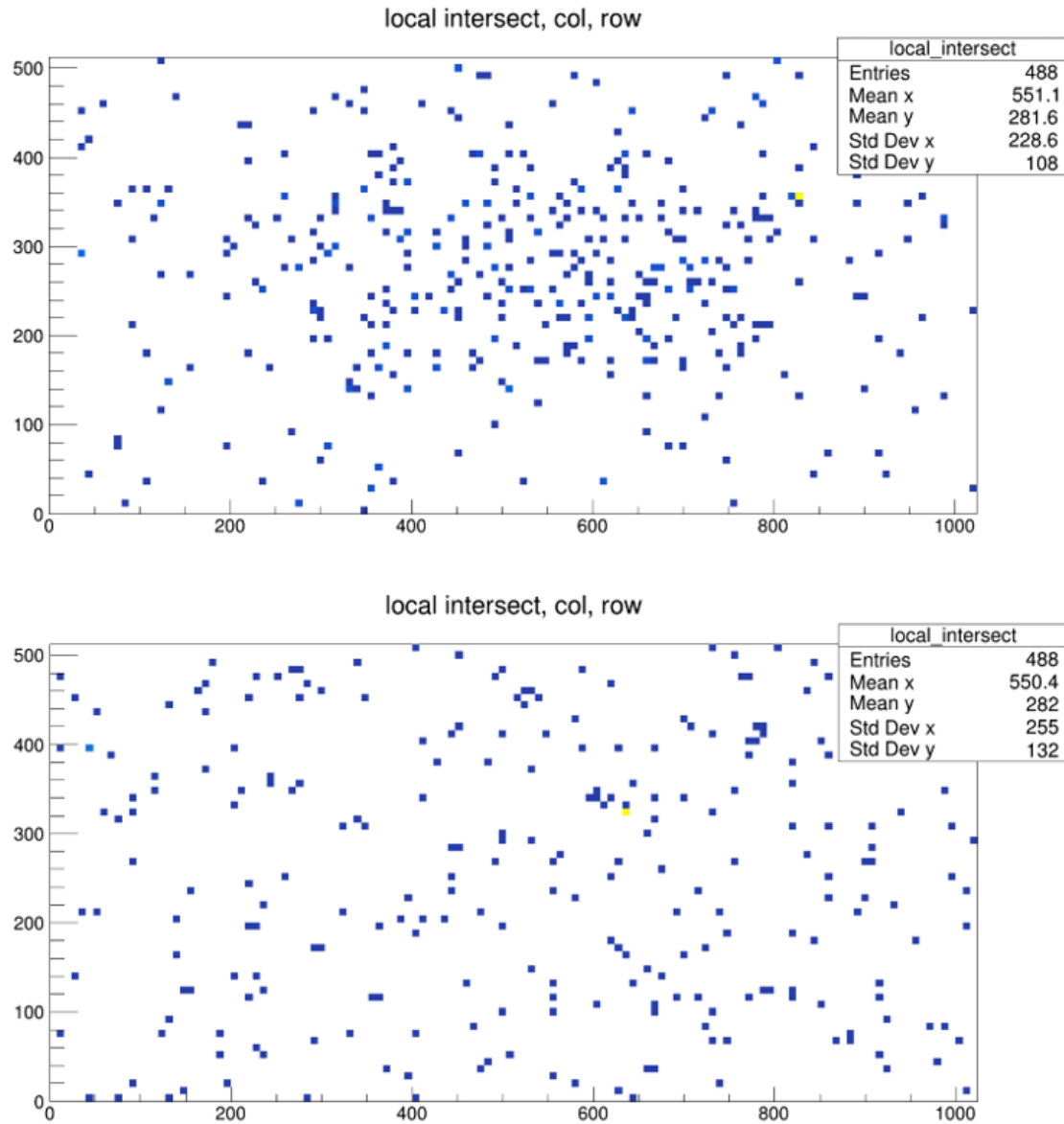
Tabella 3.2. I risultati, come quelli appena riportati, sono stati analizzati sempre con Corryvreckan. Per testare il telescopio, si è deciso di effettuare due acquisizioni con i due piani rivelatori MAPS ALTAI, ma con due diverse configurazioni del sistema di trigger, e di analizzarle successivamente mediante Corryvreckan.

Per la prima configurazione del sistema di trigger si è scelta la logica  $(S_1 \cap S_2) \cap S_0$ , utilizzando quindi solo la prima coppia di scintillatori-SiPM e lo scintillatore-PMT. I risultati di tale acquisizione, durata alcune ore, sono riportati nelle **Figure 3.10** e **3.11**. In **Figura 3.10** è riportato il confronto tra le hitmap relative ai due MAPS ALTAI. Si nota immediatamente un numero di eventi decisamente più elevato nell'ALTAI superiore (ALTAI\_0) rispetto a quello inferiore. Questo effetto è probabilmente dovuto alla geometria non ottimale del telescopio in questa configurazione, nella quale c'era un solo scintillatore di trigger, da cui ALTAI\_1 si trovava più lontano. Inoltre, l'utilizzo di un singolo trigger non permetteva di selezionare le sole tracce perpendicolari. Per questa ragione le hitmap mostrate in **Figura 3.10** ammettevano il caso nel quale, ad esempio, una particella con traccia obliqua rivelata dal trigger venisse rivelata sul primo piano, ma non sul secondo.

In **Figura 3.11** è riportato il confronto tra le posizioni, sul piano X-Y, delle intercette delle tracce delle particelle, sui due sensori ALTAI. Ogni traccia è ottenuta da Corryvreckan fittando linearmente la retta e usando come input le coordinate del centro dei cluster su ogni piano ALTAI (utilizzando un cluster per piano). Poiché si sono utilizzati solo due piani rivelatori, il software ricostruisce le tracce collegando - per uno stesso evento - i cluster sui due diversi piani attraverso delle rette.



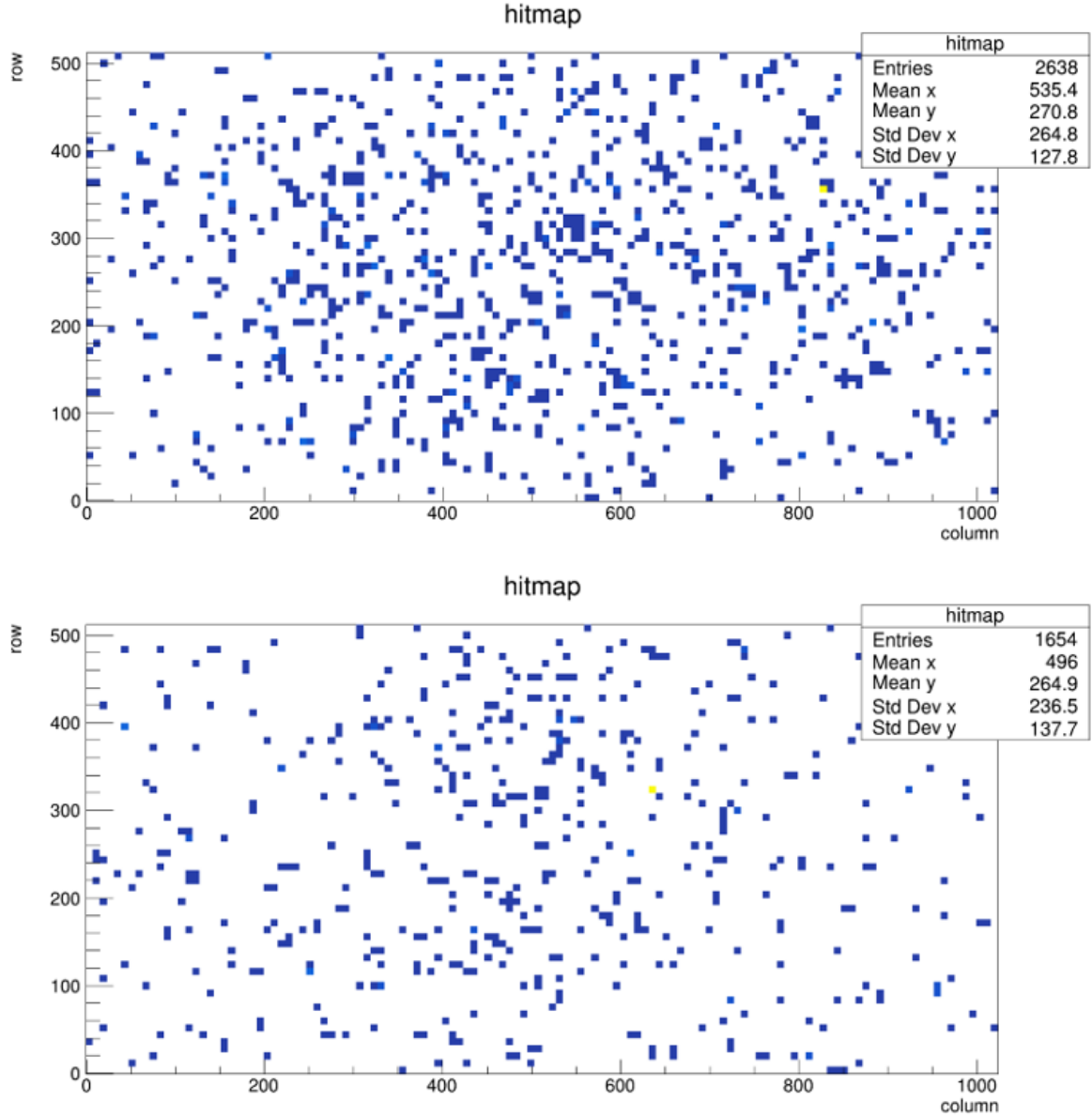
**Figura 3.10:** Hitmap dei due rivelatori nel caso della logica  $(S_1 \cap S_2) \cap S_0$ . Le coordinate sugli assi sono i pixel del MAPS ALTAI. In alto nell'immagine il sensore scelto come riferimento (ALTAI.0), in basso ALTAI.1.



**Figura 3.11:** Mappa delle intersezioni delle tracce con i piani dei due ALTAI, nell'acquisizione svolta utilizzando la logica  $(S_1 \cap S_2) \cap S_0$ . Le coordinate sugli assi sono i pixel del corrispondente ALTAI (ALTAI.0 in alto nell'immagine e ALTAI.1 in basso).

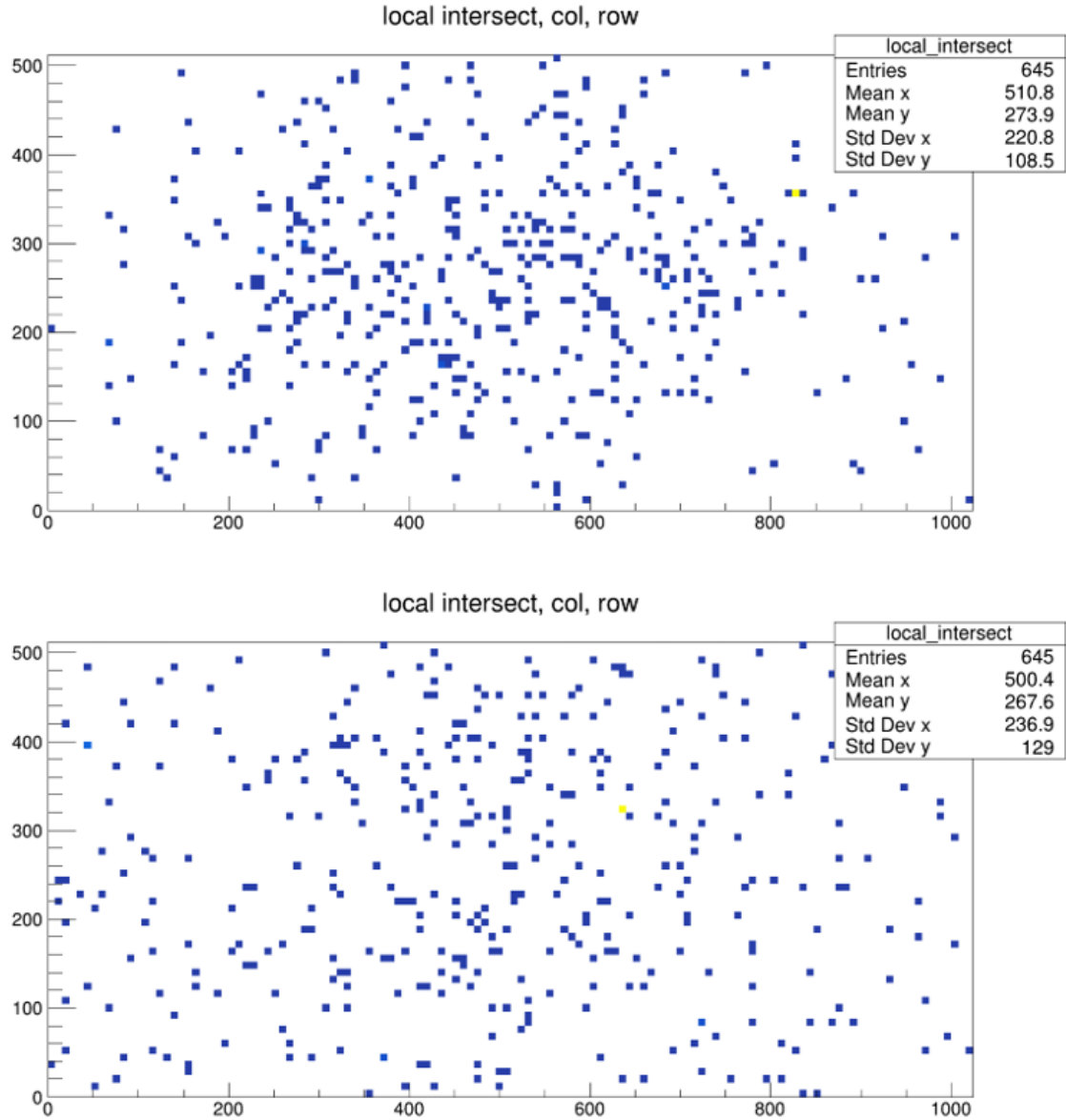
La seconda configurazione utilizzata per il sistema di trigger è stata impostata con la logica  $(S_1 \cup S_3) \cap (S_2 \cup S_4) \cap S_0$ , utilizzando quindi tutti i 5 scintillatori a disposizione. In particolare, con tale logica, si prendono in considerazione solo le particelle che hanno attraversato il fotomoltiplicatore e il braccio orizzontale della croce, indipendentemente dal fatto che fosse la coppia di scintillatori superiore o inferiore, e il braccio verticale della croce, indipendentemente da coppia superiore o inferiore. Grazie a questa logica più

restrittiva si è stati in grado di ottenere dei trigger meno dipendenti dal rumore del PMT o dei SiPM accoppiati agli scintillatori. I risultati di tale acquisizione sono riportati nelle **Figure 3.12** e **3.13**. In particolare, in **Figura 3.12** si riporta il confronto tra le hitmap relative ai due ALTAI. Anche in questa configurazione si verifica un numero di eventi molto maggiore nell'ALTAI superiore (ALTAI\_0) rispetto a quello inferiore (ALTAI\_1).



**Figura 3.12:** Hitmap dei due rivelatori nel caso della logica  $(S_1 \cup S_3) \cap (S_2 \cup S_4) \cap S_0$ . Le coordinate sugli assi sono i pixel dell'ALTAI. In alto nell'immagine il sensore scelto come riferimento (ALTAI\_0), in basso ALTAI\_1.

Analogamente alla configurazione  $(S_1 \cap S_2) \cap S_0$ , anche per la logica  $(S_1 \cup S_3) \cap (S_2 \cup S_4) \cap S_0$  è riportata in **Figura 3.13** il confronto tra le posizioni delle intercette delle tracce sulle superfici dei due ALTAI.



**Figura 3.13:** Mappa delle intersezioni delle tracce con i piani dei due ALTAI, nell'acquisizione svolta utilizzando la logica  $(S_1 \cup S_3) \cap (S_2 \cup S_4) \cap S_0$ . Le coordinate sugli assi sono i pixel del corrispondente ALTAI (ALTAI\_0 in alto nell'immagine e ALTAI\_1 in basso).



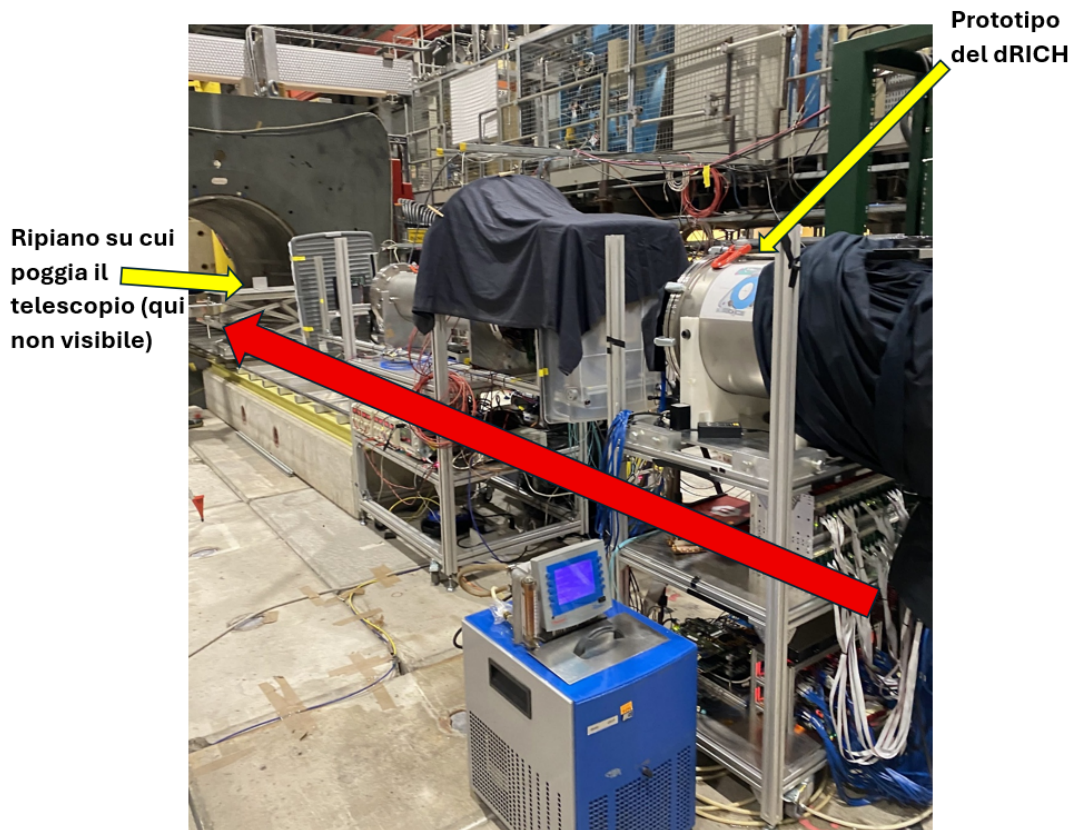
Attraverso i test effettuati nel laboratorio di Bologna si è potuto verificare il funzionamento del telescopio e dell'interfaccia di comunicazione e conversione del segnale tra il sistema di trigger e i MAPS ALTAI. Nonostante, trattandosi di raggi cosmici (caratterizzati da un rate non elevato), si sia avuto a disposizione dei campioni di dati con una bassa statistica, l'obiettivo principale di mettere in funzione e validare il telescopio è stato raggiunto. Inoltre è stato possibile intravedere una *shadow* del trigger<sup>14</sup> nelle mappe delle intercette, in particolare restringendo l'analisi dei dati agli eventi nei quali una particella passava da entrambi gli ALTAI, quindi escludendo eventi nei quali venivano registrati i pixel rumorosi. Soprattutto, come descritto nella sezione 3.1.2, il montaggio di una *trigger chain* stabile nella quale era già gestita la conversione da NIM a LVTTTL con i passaggi e gli strumenti precedentemente introdotti, ha permesso l'utilizzo del telescopio al test beam del gruppo ePIC, come riportato nelle sezioni 3.2 e 3.2.1.

---

<sup>14</sup>Per individuare la shadow si cerca una corrispondenza geometrica tra la posizione del trigger e una maggiore concentrazione di pixel colpiti sulla hitmap.



## 3.2 Apparato sperimentale presso il test beam a SPS

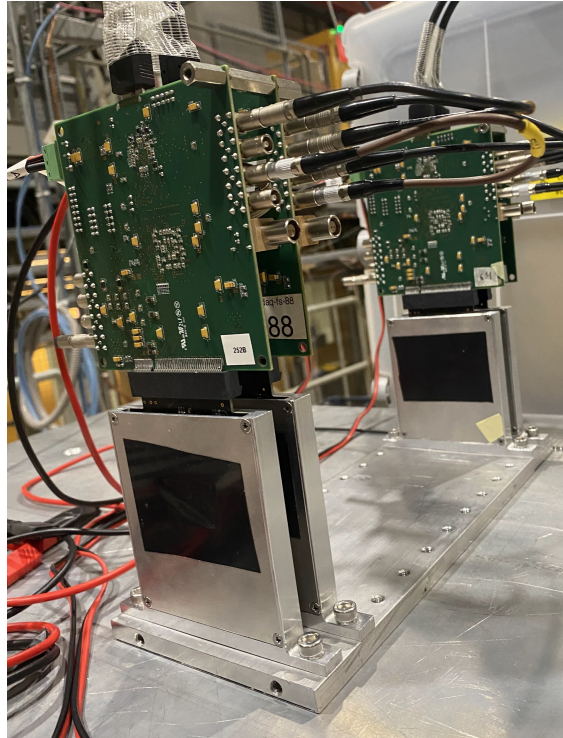


**Figura 3.14:** Fotografia dell'intero apparato al test beam. La freccia rossa indica la direzione del fascio di pioni prodotto da SPS.

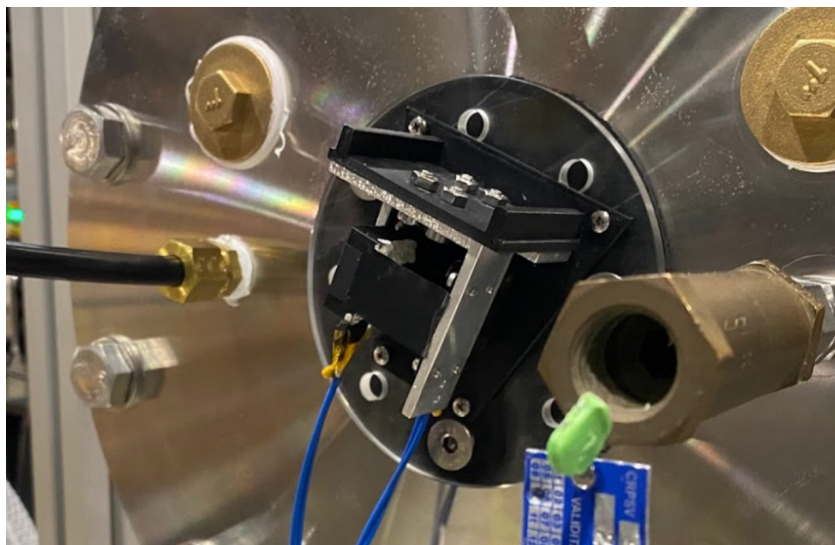
Al test beam (in **Figura 3.14** è riportata una fotografia dell'intero apparato) di novembre 2025 presso il Cern Super Proton Synchrotron (SPS), il gruppo ePIC ha potuto testare, con un fascio di pioni positivi a  $180\text{ GeV}$ , un telescopio composto da 4 piani rivelatori, fissati ad una struttura metallica identica a quella utilizzata a Bologna ma posta in orizzontale, dove sono stati collocati 4 sensori ALTAI fissati in due coppie distanti  $40\text{ cm}$ , con i due ALTAI di ogni coppia che sono stati posti ad una distanza di  $2.5\text{ cm}$  l'uno dall'altro (in **Figura 3.15** è riportata una fotografia del telescopio posizionato lungo la linea di fascio). Il telescopio è stato integrato con l'elettronica di trigger e di read-out del prototipo di dRICH. In particolare al test beam il gruppo ePIC ha utilizzato un sistema di trigger diverso da quello utilizzato nei test realizzati a Bologna con i raggi cosmici: un segnale NIM ottenuto come un AND logico tra lo *spill*<sup>15</sup> del fascio e uno scintillatore

<sup>15</sup>Il segnale di *spill*, fornito centralmente dalla *control room* di SPS, è stato utilizzato all'interno della setup per segnalare il passaggio delle particelle del fascio.

rettangolare posizionato, lungo la linea di fascio (una fotografia è riportata in **Figura 3.16**), tra il dRICH e il telescopio. In questa maniera, seguendo questo approccio, è stato possibile sincronizzare la DAQ del telescopio e quella del prototipo di dRICH, con lo scopo finale di ottenere una corrispondenza evento per evento all'interno dei due file prodotti come output dalle due differenti DAQ durante una singola acquisizione.



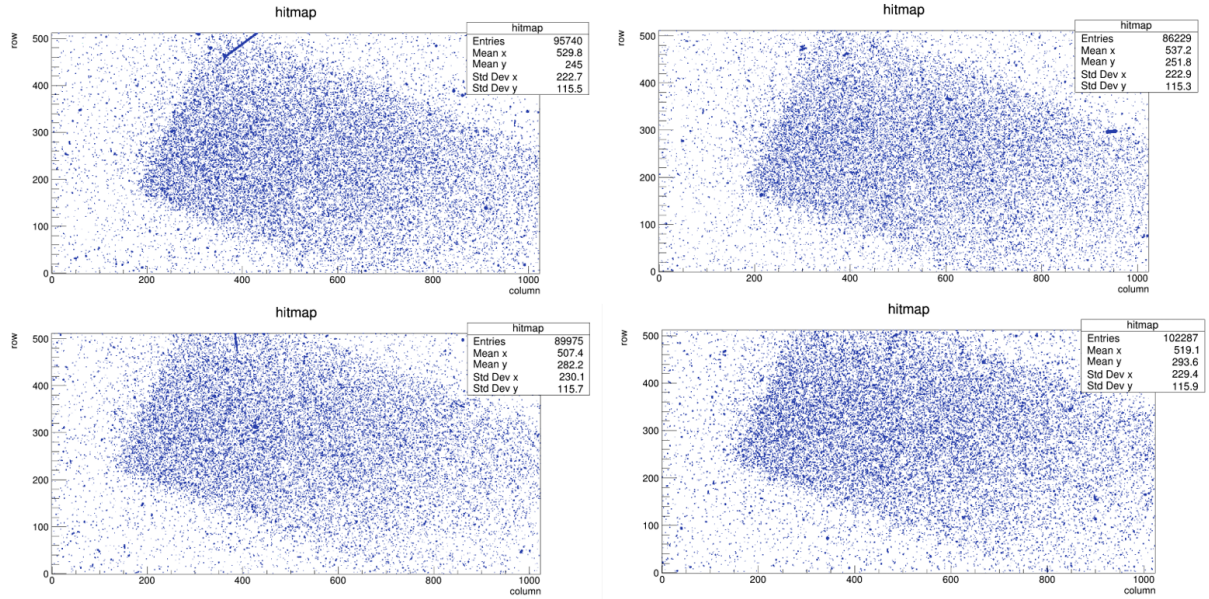
**Figura 3.15:** Fotografia dell'apparato del telescopio in posizione lungo la linea di fascio di SPS.



**Figura 3.16:** Fotografia dello scintillatore rettangolare utilizzato, insieme al segnale di spill del fascio, come sistema di trigger presso il test beam SPS.

### 3.2.1 Risultati del test beam

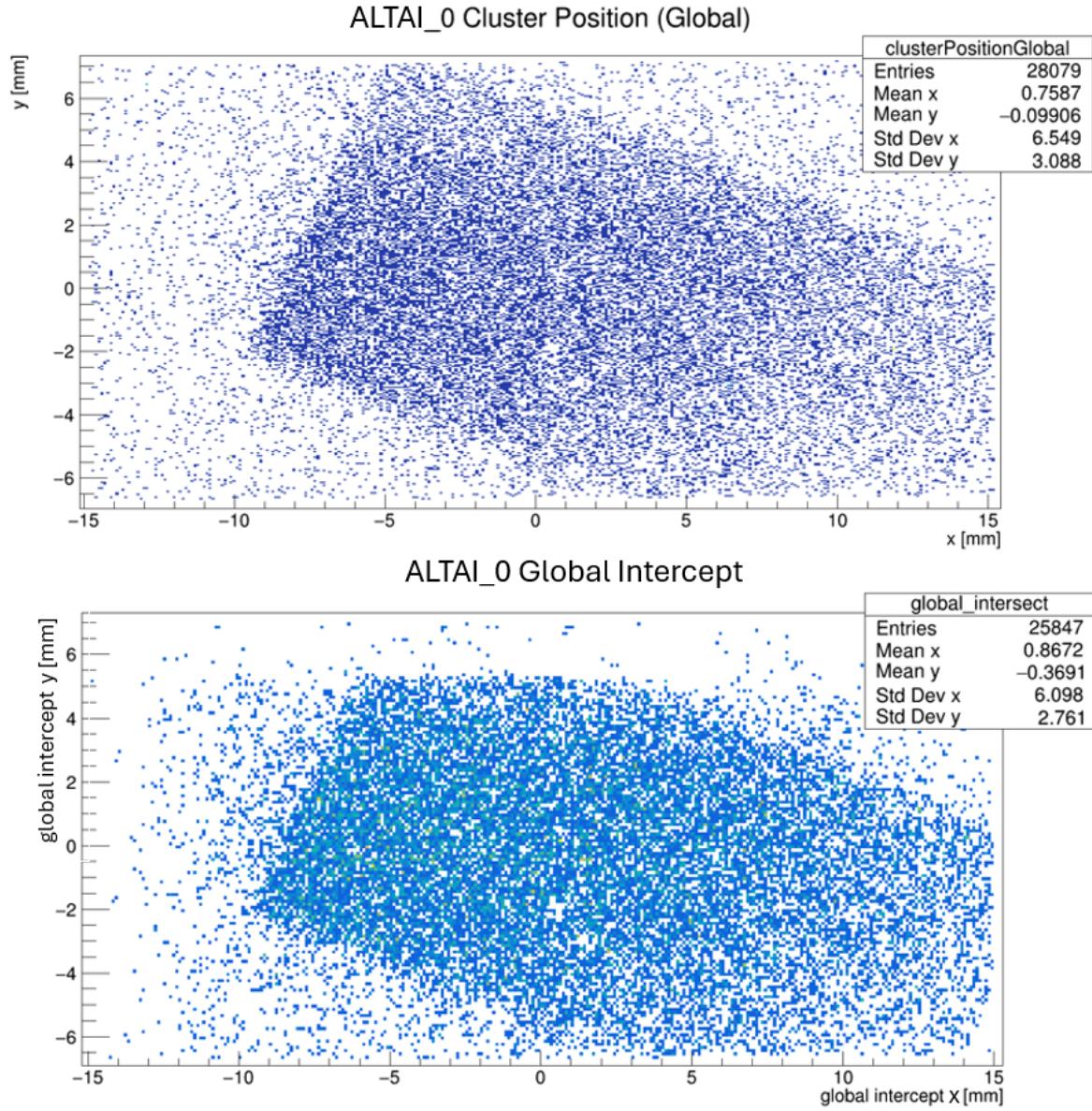
L'analisi, effettuata utilizzando Corryvreckan, dei dati provenienti dal test beam ha permesso la produzione delle 4 hitmap, una per ognuno dei 4 ALTAI utilizzati (indicati come ALTAI\_0, ALTAI\_1, ALTAI\_2 e ALTAI\_3), riportate in **Figura 3.17**. Grazie alla shadow del trigger ben visibile si può immediatamente notare la forma rettangolare e inclinata del trigger utilizzato (AND logico tra uno scintillatore rettangolare e il segnale di spill del fascio). La rotazione della shadow osservata è dovuta alla posizione dello scintillatore utilizzato come trigger, ruotato meccanicamente attorno all'asse Z, ma l'evidenza di tale inclinazione (visibile in **Figura 3.16**) nelle hitmap risultanti è un'ulteriore conferma del funzionamento del telescopio.



**Figura 3.17:** Hitmap dei 4 MAPS ALTAI utilizzati al test beam. La hitmap in alto a sinistra nella figura è relativa al rivelatore scelto come riferimento (ALTAI\_0); in alto a destra ALTAI\_1, in basso a sinistra ALTAI\_2, e in basso a destra ALTAI\_3.

Inoltre, la possibilità al test beam di assemblare il telescopio con 4 piani rivelatori ha permesso un allineamento vero e proprio dei 4 ALTAI attraverso Corryvreckan. Infatti, avendo a disposizione 4 ALTAI posizionati parallelamente l'uno all'altro (e una elevata statistica), il software è in grado di ricostruire le tracce delle particelle del fascio unendo i punti sui 4 piani corrispondenti ai cluster formatisi al passaggio della particella carica, e da queste allineare in maniera precisa i 4 MAPS. Svolto l'allineamento, il software è in grado di effettuare un fit delle rette relative alle tracce delle particelle con le corrispondenti posizioni dei cluster di pixel sui 4 piani rivelatori. In **Figura 3.18** sono riportati la hitmap dei cluster e la mappa delle intercette delle tracce per l'ALTAI scelto come riferimento (indicato come ALTAI\_0).

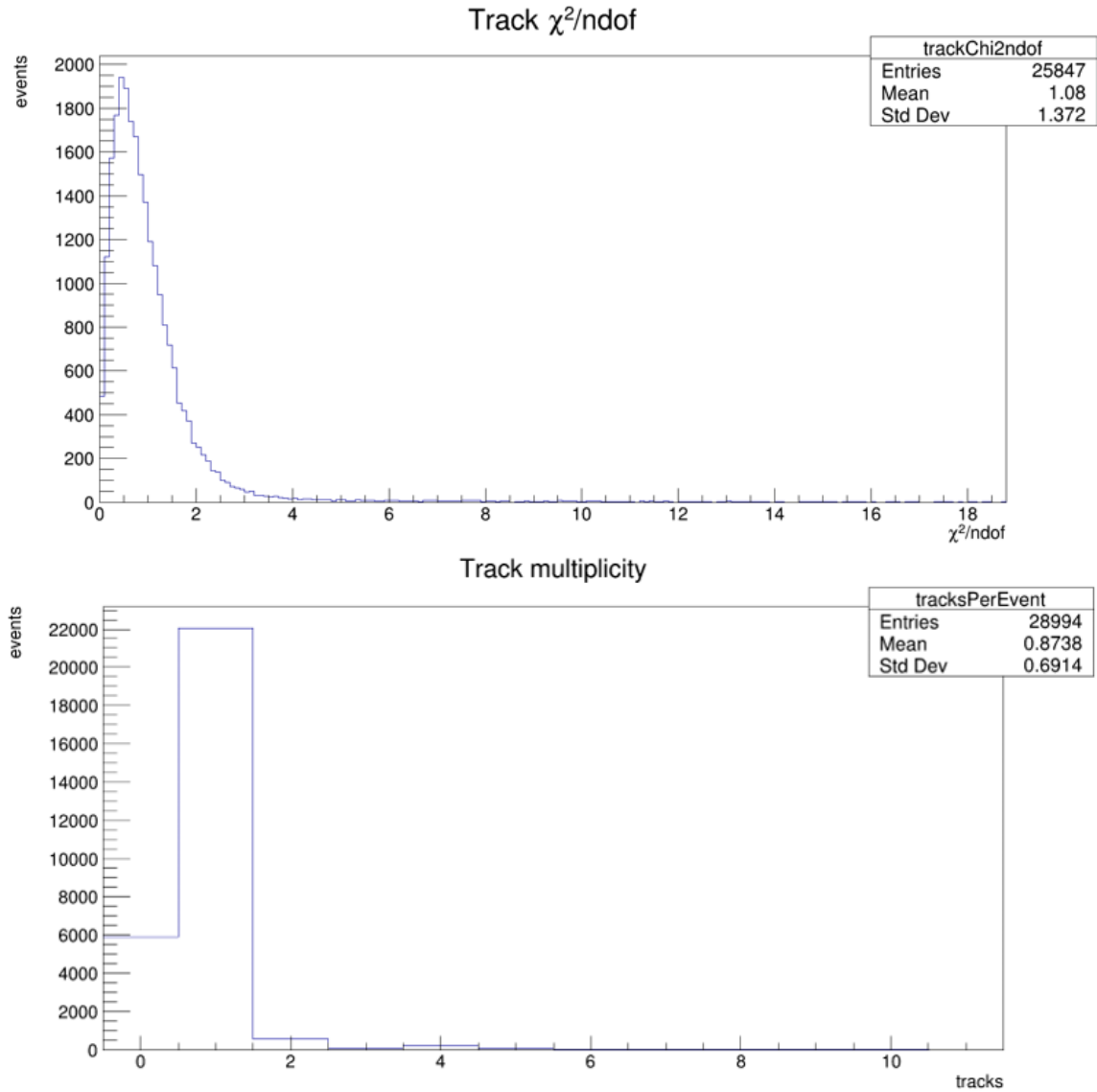




**Figura 3.18:** Mappe dei cluster e delle intercette delle tracce rivelate al test beam, relativi al sensore (indicato come ALTAI\_0) scelto come riferimento. In alto nella figura è presente la hitmap dei cluster. In basso la mappa delle intersezioni delle tracce ottenute dai 4 ALTAI.

Grazie all'utilizzo di 4 piani rivelatori è quindi possibile ottenere un buon allineamento dei detector. Calcolando il  $\tilde{\chi}^2$  ( $\chi^2$  ridotto, ovvero il  $\chi^2$  diviso il numero di gradi di libertà) si può valutare la bontà del fit delle tracce. In **Figura 3.19** sono mostrati gli istogrammi del  $\tilde{\chi}^2$  e del numero di tracce per evento relativi ad un'acquisizione svolta al test beam

integrando la DAQ di ePIC con quella del telescopio. Il  $\tilde{\chi}^2 \approx 1.08$  è molto vicino a 1 e ciò mostra la bontà dell'allineamento dei sensori. Anche il numero di tracce per evento ( $\approx 0.87$ ) è vicino a 1. I risultati ottenuti al test beam hanno consentito di raccogliere per la prima volta dati di tracciamento sincronizzato tra la DAQ del prototipo dRICH e quella del telescopio.



**Figura 3.19:** Istogrammi del  $\tilde{\chi}^2$  (in alto nella figura) e del numero di tracce per evento (in basso) relativi all'acquisizione svolta al test beam.

# Conclusioni

Lo scopo principale di questo lavoro di tesi era la costruzione e messa in funzione di un telescopio tracciatore di particelle basato su sensori MAPS. Obiettivo ulteriore era la validazione di un sistema di trigger adatto anche per l'integrazione del dispositivo tracciatore con l'apparato del prototipo di dRICH.

Nel laboratorio di Bologna sono stati svolti i primi test sul telescopio, formato da 2 piani ALTAI. Grazie alla realizzazione di una catena di conversione del segnale di trigger da analogico a digitale NIM, e da NIM a TTL e infine a LVTTL, si è potuto utilizzare il telescopio ad un test beam su fascio di SPS al CERN.

Il telescopio costruito nel laboratorio di Bologna è stato testato con raggi cosmici e ha mostrato un funzionamento corretto, anche se la bassa statistica ha permesso di visualizzare nelle hitmap e nelle mappe delle intercette delle tracce solamente dei trend, lasciando solo intravedere la shadow del trigger. Inoltre, a causa della possibilità di utilizzare solo due piani rivelatori per il prototipo di telescopio a Bologna, si è svolta un'analisi senza tracciamento delle particelle e allineamento degli ALTAI.

Nella parte finale del lavoro di tesi sono stati analizzati i dati raccolti al test beam con un fascio di particelle cariche, utilizzando una versione del telescopio dotata di 4 piani rivelatori. Le relative hitmap hanno mostrato una ben visibile shadow del trigger grazie all'elevata statistica, alla direzione precisa delle particelle del fascio, e ad un buon allineamento degli ALTAI, valutabile mediante il calcolo del  $\tilde{\chi}^2$  dal fit delle rette relative alle tracce delle particelle con le corrispondenti posizioni dei cluster di pixel sui 4 piani rivelatori.

Il presente lavoro costituisce un primo passo verso una più completa integrazione tra i due sistemi di acquisizione in vista dei prossimi test beam con il prototipo di dRICH ePIC.





# Appendici



# Appendice A

## Software di analisi

### A.1 Corryvreckan

Corryvreckan è un *framework* utilizzato per l'analisi di dati da test beam, con un particolare focus sulla ricostruzione e il tracciamento di particelle cariche e con la possibilità di inserire anche detector diversi tra loro per tipologia. Un'importante caratteristica di tale software è la suddivisione del processo di ricostruzione e analisi dati in vari step in modo da ottenere svolgere analisi con diversi livelli di dettaglio. I risultati dell'analisi di Corryvreckan vengono mostrati su delle *canvas* attraverso **ROOT**<sup>1</sup>. [24]

In questo lavoro di tesi si è svolta un'analisi dei dati allo scopo di ricostruire le tracce delle particelle rivelate dai sensori ALTAI, utilizzando i seguenti moduli di Corryvreckan: [25]

- **Mask Creation**, per mascherare i pixel rumorosi;
- **Prealignment**, per allineare i sensori prendendo uno di essi come riferimento;
- **Alignment**, per effettuare un allineamento più preciso.

Il modulo *Mask Creation* ha il compito di mascherare i pixel (cioè scartare i dati raccolti da tali pixel) del sensore che sono considerati troppo rumorosi, e mostrarli su una hitmap. La selezione viene fatta sulla base di un valore di soglia, *frequency\_cut*, fornito dall'utente: si mascherano i pixel che si sono accesi più di *frequency\_cut* volte del rate di accensioni medio, calcolato su tutti i pixel del detector. Si è scelto il valore *frequency\_cut* = 1000.

Il modulo *Prealignment* anzitutto riconosce i cluster tra i gruppi di pixel adiacenti, tenendo conto in partenza dei pixel appena mascherati col modulo precedente. Successivamente applica un algoritmo di preallineamento basato sulla mappa dei cluster mostrando una hitmap con la posizione dei cluster di pixel rispetto al sensore in oggetto

---

<sup>1</sup>ROOT è un framework, sviluppato al CERN, che permette l'analisi e la visualizzazione di grandi quantità di dati.

e rispetto all'apparato del laboratorio, e un istogramma con la distribuzione Lorentziana del numero di pixel che compongono i cluster. Inoltre, il modulo *Prealignment* calcola le correlazioni lungo l'asse X e lungo l'asse Y dei cluster di pixel dei sensori, rispetto al detector scelto come riferimento, e ne fa un fit gaussiano.

Il modulo *Alignment* svolge una funzione simile a *Prealignment*, ma con metodi molto più accurati. L'algoritmo utilizzato da questo modulo è *Alignment Millepede* e si basa su un certo numero di gradi di libertà scelti dall'utente (nel nostro caso sono tre: traslazioni lungo l'asse X, lungo l'asse Y e rotazioni del piano XY intorno all'asse della direzione del fascio). Prima di effettuare l'allineamento, il modulo *Alignment* provvede alla ricostruzione delle tracce basandosi sulle posizioni dei cluster ottenute dal preallineamento. Per ogni traccia viene richiesto in ricostruzione 1 cluster per detector (nel caso del test beam a SPS 4 cluster presi dallo stesso evento, uno per ogni ALTAI), e la traccia viene ottenuta come fit lineare dei punti considerati. In questa maniera tale modulo è in grado di fare un allineamento preciso dei detector basandosi sulle tracce rettilinee delle particelle rivelate. Per ottenere allineamenti migliori si può riutilizzare più volte (nell'analisi riportata per il test beam, è stato utilizzato tre volte) il modulo *Alignment* sullo stesso set di dati. *Alignment* calcola anche il  $\chi^2$  e il  $\tilde{\chi}^2$  delle tracce ottenute, se si utilizzano almeno tre piani rivelatori. In generale si può considerare il  $\tilde{\chi}^2$  come un ottimo parametro per determinare la bontà del tracciamento ottenuto durante l'acquisizione.

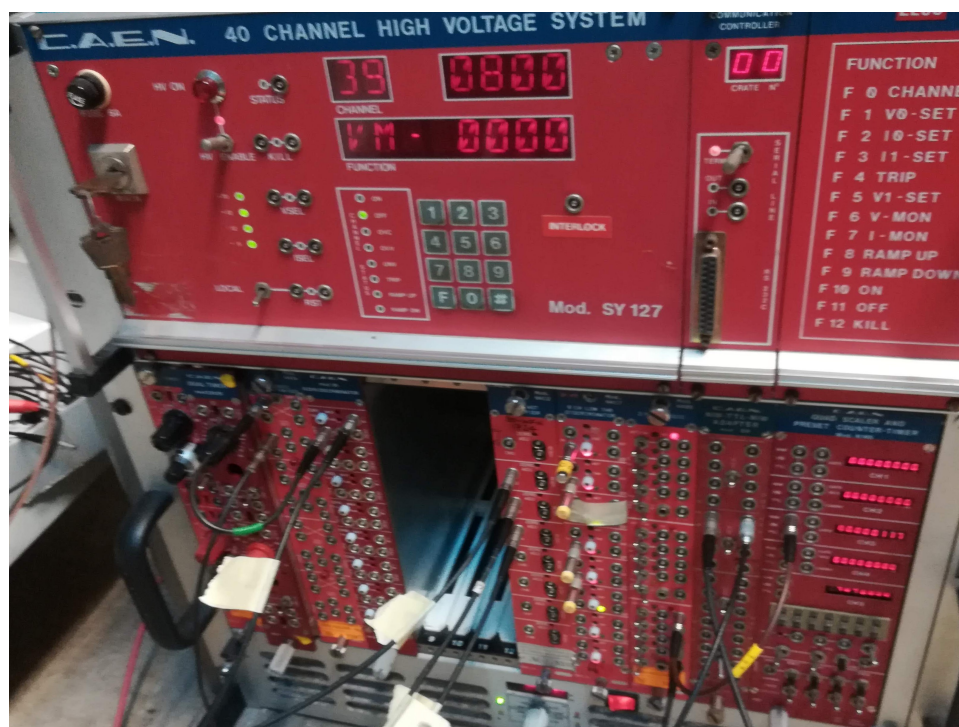
# Appendice B

## Strumentazione

### B.1 Strumenti e dispositivi utilizzati

Nel laboratorio di Bologna sono stati utilizzati i seguenti dispositivi:

1. **C.A.E.N 40-Channel High Voltage System Mod. SY127** per l'alimentazione dello scintillatore-PMT (**Figura B.1**);
2. un oscilloscopio **Tektronix 2 Series Mixed Signal Oscilloscope** per osservare i segnali durante i tes del sistema di trigger;
3. un *pulser* generatore di funzioni **Aim-TTi (Aim & Thurlby Thandar Instruments) TGP110 10 MHz Pulse Generator**;
4. **C.A.E.N 12-Slot NIM Powered Crate (Figura B.1)** con i seguenti moduli:
  - C.A.E.N. 4-0 Logic Fan-In Fan-Out Mod. N454;
  - C.A.E.N 8-Channel Discriminator Mod. 96;
  - C.A.E.N. 8-Channel Fast Amplifier Mod. N412;
  - C.A.E.N. 8-Channel Low Threshold Discriminator Mod. N417;
  - C.A.E.N. 3-Fold Logic Unit Mod. N405;
  - C.A.E.N. NIM-TTL-NIM Adapter Mod. 89;
  - C.A.E.N. Quad Scaler and Preset Counter-Timer Mod. N145.



**Figura B.1:** Fotografia del generatore di alta tensione (in alto nell'immagine) e dei moduli del Crate NIM (in basso).

# Bibliografia

- [1] Brookhaven National Laboratory, *Relativistic Heavy Ion Collider: RHIC Accelerators*, Online, URL: <https://www.bnl.gov/rhic/complex.php>.
- [2] S. Peggs et al., «Electron-Ion Collider: Preliminary Design Report», in: *Accelerator Geometry and Parameter Tables* (2025), URL: [https://eic.jlab.org/Documents/EIC-General/EIC\\_ParameterList.pdf](https://eic.jlab.org/Documents/EIC-General/EIC_ParameterList.pdf).
- [3] R. Abdul Khalek et al., «Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider: EIC Yellow Report», in: *Nuclear Physics A* 1026 (2022), p. 122447, ISSN: 0375-9474, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2022.122447, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947422000677>.
- [4] ePIC Collaboration, *The ePIC Detector*, Online, 2025, URL: <https://www.epic-eic.org/public/detector.html>.
- [5] Brookhaven National Laboratory, *Electron-Ion Collider: The ePIC Collaboration*, Online, 2025, URL: <https://www.bnl.gov/eic/epic.php>.
- [6] Luisa Rosa Maria Occhiuto et al., «The dRICH detector at the ePIC experiment», in: *PoS QNP2024* (2025), p. 009, DOI: 10.22323/1.465.0009.
- [7] S. Vallarino et al., «Prototype of a dual-radiator RICH detector for the Electron-Ion Collider», in: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 1058 (2024), p. 168834, ISSN: 0168-9002, DOI: 10.1016/j.nima.2023.168834, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900223008252>.
- [8] INFN: Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Raggi Cosmici*, 2025, URL: <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>.
- [9] N. Tomassetti, *Astrofisica dei Raggi Cosmici: fenomenologia e modelli*, Online, URL: [https://www.fisgeo.unipg.it/~fiandrin/didattica\\_fisica/cosmic\\_rays1819/cosmic\\_ray\\_lez20\\_21\\_191218\\_201218\\_RaggiCosmici.pdf](https://www.fisgeo.unipg.it/~fiandrin/didattica_fisica/cosmic_rays1819/cosmic_ray_lez20_21_191218_201218_RaggiCosmici.pdf).
- [10] F. G. Schröder, «Radio detection of Cosmic-Ray Air Showers and High-Energy Neutrinos», in: *Progress in Particle and Nuclear Physics* 93 (2017), DOI: 10.1016/j.ppnp.2016.12.002, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641016300758>.

- [11] T. K. Gaisser, R. Engel e E. Resconi, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 2016, DOI: 10.1017/CB09781139192194.
- [12] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1994, DOI: 10.1007/978-3-642-57920-2.
- [13] B. I. Shklovskii e A. L. Efros, *Electronic Properties of Doped Semiconductors*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1984, DOI: 10.1007/978-3-662-02403-4.
- [14] F. Hartmann, *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*, Springer, 2009, DOI: 10.1007/b106762.
- [15] W. Shockley, *Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge*, Journal of Applied Physics, 1938, DOI: 10.1063/1.1710367.
- [16] S. Gundacker F. Acerbi, «Understanding and simulating SiPMs», in: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* (2019), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218317704>.
- [17] E. Rapkin, *Photomultipliers and How They Operate*, URL: [https://www.fe.infn.it/u/spizzo/met\\_fis/radioattivita/PHOTOMULTIPLIERS%20and%20HOW%20THEY%20OPERATE.htm](https://www.fe.infn.it/u/spizzo/met_fis/radioattivita/PHOTOMULTIPLIERS%20and%20HOW%20THEY%20OPERATE.htm).
- [18] A. Ghassemi, K. Sato e K. Kobayashi, *A technical guide to silicon photomultipliers (MPPC) - Section 1*, rapp. tecn., Hamamatsu Corporation, 2018, URL: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/a-technical-guide-to-silicon-photomultipliers-MPPC-Section-1.html>.
- [19] P. Buzhan et al., «Silicon photomultiplier and its possible applications», in: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 504.1 (2003), Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Photodetection, pp. 48–52, ISSN: 0168-9002, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00749-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00749-6), URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203007496>.
- [20] A. N. Otte et al., «A measurement of the photon detection efficiency of silicon photomultipliers», in: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 567, Issue 1* (2006), DOI: 10.1016/j.nima.2006.05.145, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900206009788>.
- [21] A. Colelli et al., «Characterization of Monolithic Active Pixel Sensors for future collider experiments», in: *International Workshop on Quantum Chromodynamics: Theory and Experiment* (2024), DOI: 10.1051/epjconf/202431400034.



- [22] R. Turchetta et al., *CMOS Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS): developments and future outlook*, Online, URL: [https://indico.cern.ch/event/1151/contributions/63326/attachments/49489/71128/renato\\_turchetta\\_vertex06\\_v1.pdf](https://indico.cern.ch/event/1151/contributions/63326/attachments/49489/71128/renato_turchetta_vertex06_v1.pdf).
- [23] S. Siddhanta et al., «A Readout System for single ALPIDE sensors of the ALICE Inner Tracking System Upgrade», in: *2020 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)* (2020), DOI: 10.1109/NSS/MIC42677.2020.9508095, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9508095>.
- [24] The Corryvreckan Authors, *Corryvreckan: The Maelstrom for Your Test Beam Data*, 2021, URL: <https://project-corryvreckan.web.cern.ch/project-corryvreckan/>.
- [25] M. Williams, S. Spannagel e J. Kröger, *Corryvreckan User Manual*, Version v2.0-1699-g87c7980, 2024.



# Mediografia

- [26] Abhay Deshpande, *The Electron-Ion Collider: Science and Status*, Online, 2024, URL: <https://indico.cern.ch/event/1358446/contributions/6137383/attachments/2937045/5159104/EIC%20at%20Yerevan%20present.pdf>.
- [27] Brookhaven National Laboratory, *Brookhavenlab Electron-Ion Collider*, Online, 2025, URL: <https://www.flickr.com/photos/brookhavenlab/albums/72157714316624996/with/54369440150>.
- [28] A. B. Arbuzov, *Quantum Field Theory and the Electroweak Standard Model*, Online, 2018, URL: <https://arxiv.org/abs/1801.05670>.
- [29] ePIC Collaboration, *The ePIC Detector*, Online, 2025, URL: <https://www.epic-eic.org/public/detector.html>.
- [30] Brookhaven National Laboratory, *Electron-Ion Collider: The ePIC Collaboration*, Online, 2025, URL: <https://www.bnl.gov/eic/epic.php>.
- [31] Luigi Rignanese, *The dRICH photosensors: SiPM studies. Giornate Nazionali EIC\_NET 2024*, Online, 2024, URL: <https://agenda.infn.it/event/39909/contributions/236368/attachments/122702/179715/Rignanese%20giornate%20nazionali.pdf>.
- [32] Martina Adamo, Silvia Pietroni e Maurizio Spurio, *Astrophysical sources and acceleration mechanisms*, Online, 2022, URL: [https://www.researchgate.net/figure/The-differential-energy-spectrum-PHE-units-particles-m-2-sr-s-GeV-of-cosmic-rays-over\\_fig5\\_358740951](https://www.researchgate.net/figure/The-differential-energy-spectrum-PHE-units-particles-m-2-sr-s-GeV-of-cosmic-rays-over_fig5_358740951).
- [33] INFN: Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Raggi Cosmici*, 2025, URL: <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici>.
- [34] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, 1994, DOI: 10.1007/978-3-642-57920-2.
- [35] Mike Thompson, *Diodes: Everything You Wanted To Know And More*, Online, 2020, URL: <https://www.electronicdesignhq.com/diodes>.

- [36] B. Iwan, *Development of the PoGOLite Star Tracker System and construction of detector units for the Polarimeter Telescope Assembly*, Online, 2007, URL: [https://www.researchgate.net/publication/265272627\\_Development\\_of\\_the\\_PoGOLite\\_Star\\_Tracker\\_System\\_and\\_construction\\_of\\_detector\\_units\\_for\\_the\\_Polarimeter\\_Telescope\\_Assembly](https://www.researchgate.net/publication/265272627_Development_of_the_PoGOLite_Star_Tracker_System_and_construction_of_detector_units_for_the_Polarimeter_Telescope_Assembly).
- [37] A. Ghassemi, K. Sato e K. Kobayashi, *A technical guide to silicon photomultipliers (MPPC) - Section 1*, rapp. tecn., Hamamatsu Corporation, 2018, URL: [https://hub.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/static/hc/resources/TN0014/mppc\\_kapd9005e.pdf](https://hub.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/static/hc/resources/TN0014/mppc_kapd9005e.pdf).
- [38] Christine Hu Guo, *CMOS Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)*, Online, 2018, URL: [https://indico.ihep.ac.cn/event/7736/contributions/97300/attachments/51747/59623/MAPS\\_CPS.pdf](https://indico.ihep.ac.cn/event/7736/contributions/97300/attachments/51747/59623/MAPS_CPS.pdf).
- [39] Physics Open Lab, *Spettroscopia Raggi X con Fotodiodo PIN*, Online, 2017, URL: <https://physicsopenlab.org/2017/06/22/spettroscopia-raggi-x-con-fotodiodo-pin>.
- [40] Giovanni Gulli, *Caratteristica I-V di un fotodiodo*, Online, URL: <http://giovannigulli.altervista.org/PRESENTAZIONE%20BARRIERA%20LUMINOSA.pdf>.

# Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto la persona che più di chiunque altro (forse anche più di me stesso) desiderava il raggiungimento di questo obiettivo da me visto quasi inarrivabile, e che non si è limitata ad incoraggiarmi per completare il percorso ma mi ha letteralmente impedito di arrendermi: **mamma** hai avuto ragione!

A lei vanno aggiunti ovviamente papà, mio fratello F. e tutti i 4 nonni della nostra famiglia, che sono sempre stati al mio (e al nostro) fianco in questo periodo difficile per tutti.

Vanno poi ringraziati i miei *amici del liceo* per essere sempre stati presenti e non avermi mai messo da parte anche quando sparivo: A., M., G., R. e F. (sì lo so non eri del liceo ma ormai sei classificato qui), grazie per tutto quello che abbiamo vissuto insieme in questi anni.

Certamente ringraziamo anche G., F. e G. per tutte le serate di pizza a casa nostra e tanto altro. E vanno ringraziati anche tutti i nuovi e vecchi compagni della squadra di calcio a 7, e F., il suo fondatore.

Gli altri amici ed ex compagni del liceo, anche se per un certo periodo ci siamo frequentati meno, abbiamo comunque vissuto diversi anni in classe insieme, e quindi perché non ringraziare anche voi: T., S., M. (in particolare per gli sforzi nell'organizzare e chiamarmi sempre ai calcetti), L., A., C., A., ... e tanti altri.

Un grazie a M. per il percorso che abbiamo iniziato più di un anno e mezzo fa, e che mi ha aiutato molto a superare diversi scogli e arrivare fino a qui oggi.

Un gigantesco ringraziamento va ovviamente a R., per avermi guidato perfettamente in questa ultima parte del percorso. Sono veramente felice di averti conosciuto e di aver stabilito un bellissimo legame in questi due mesi. Grazie anche a G., per avermi accompagnato in questa fase e per il discorso di incoraggiamento a proseguire questa strada: ammetto di avervi fatto un po' impazzire voi due con la mia decisione improvvisa di finire il tutto e consegnare in pochi giorni (in compenso io e R. non ci siamo mai annoiati). Con voi vanno ringraziati tutto il gruppo di colleghi e amici di R.: E., S., N., ... e tanti altri; mi avete accolto come se fossi uno di voi e mi sono trovato veramente bene in queste settimane.