

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

**Sviluppo di un sistema di monitoraggio  
ambientale per la caratterizzazione di  
rivelatori al Silicio.**

**Relatore:**

**Prof. Alberto Cervelli**

**Presentata da:**

**Marco Colonna**

**Correlatore:**

**Dott.ssa Carla Sbarra**

## Abstract

Inner Tracker (ITK) è il nome del futuro tracciatore dell'esperimento ATLAS, sostituito dell'attuale Inner Detector (ID). ITK sarà costituito solo da rivelatori al silicio con geometria a strip e a pixel.

ITK è un upgrade necessario perchè ATLAS lavori durante la Fase II del Large Hadron Collider (LHC): High-Luminosity LHC. Le condizioni di lavoro a HL LHC richiedono una maggiore granularità, rispetto al detector attuale, per far fronte alla maggiore molteplicità delle tracce cariche.

Le correnti più elevate dei fasci, e la maggiore luminosità, si riflettono in un maggiore flusso di radiazione. Per garantire le operazioni del detector nel lungo periodo ITK dovrà avere una robustezza alle radiazioni superiore rispetto a ID.

Uno dei compiti del gruppo dell'INFN di Bologna è la qualifica di una parte dei moduli del rivelatore che comporrà gli strati più interni di ITK. È previsto che ciascun modulo (insieme di materiale attivo, chip di readout e PCB per le connessioni) sia sottoposto a cicli termici per verificare la robustezza del collegamento tra le sue parti. I moduli devono anche essere messi in funzione in ambienti a temperature diverse, in particolare a quelle previste durante la presa dati.

In questi passaggi è importante associare alle misure fatte sui moduli le misure delle condizioni ambientali. Si tengono sotto controllo temperatura e umidità dell'ambiente e la temperatura del modulo stesso. Misurare la temperatura permette di controllare che i test avvengano secondo le specifiche e a temperature che non pregiudichino la qualità dei risultati. Misurare l'umidità permette di garantire che le operazioni avvengano a temperature lontane dal punto di rugiada, eliminando il rischio di condensazione di acqua sui moduli.

L'elaborato presenta il mio lavoro per lo sviluppo del sistema di monitoraggio delle condizioni ambientali. Il sistema ha permesso di misurare la temperatura e l'umidità durante i test dei moduli e di registrare le misure su un database.

# Indice

<b>1</b>	<b>Tracciatori al Silicio</b>	<b>4</b>
1.1	Traccia di una particella . . . . .	4
1.2	Semiconduttori . . . . .	7
1.2.1	Drogaggio di semiconduttori . . . . .	9
1.2.2	Correnti nei semiconduttori . . . . .	11
1.3	Giunzione P-N . . . . .	13
1.3.1	Polarizzazione inversa e corrente di buio . . . . .	15
1.3.2	Capacità intrinseca . . . . .	16
1.4	Rivelatori al silicio . . . . .	17
1.4.1	Interazione radiazione materia . . . . .	17
1.4.2	Rivelatori a stato solido . . . . .	18
1.4.3	Rivelatori a pixel . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Inner Tracker dell'esperimento ATLAS</b>	<b>23</b>
2.1	HL-LHC e i motivi dell'upgrade ITK . . . . .	23
2.1.1	Luminosità . . . . .	23
2.1.2	L'attuale tracciatore: Inner Detector . . . . .	25
2.1.3	Il problema del danno da radiazione . . . . .	26
2.2	Il tracciatore di ITK . . . . .	28
2.2.1	Schema di ITK . . . . .	29
2.2.2	Prestazioni del tracciatore . . . . .	30
2.3	Componenti di ITK . . . . .	32
2.3.1	Rivelatori a pixel in ITK . . . . .	32
2.3.2	Chip di Front-End . . . . .	34

2.4	Processo di produzione dei moduli di ITK . . . . .	35
2.4.1	Costruzione e assemblaggio . . . . .	35
2.4.2	Caratterizzazione . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Sistema di controllo delle condizioni ambientali</b>	<b>38</b>
3.1	Sistema di lettura . . . . .	38
3.1.1	SHT85 e I2C . . . . .	40
3.1.2	Multiplexer TCA9548 . . . . .	41
3.1.3	NTC . . . . .	43
3.1.4	Convertitore ADS1115 . . . . .	45
3.2	Distribuzione Wi-Fi e immagazzinazione delle letture . . . . .	48
3.2.1	MQTT Broker . . . . .	49
3.2.2	InfluxDB . . . . .	50
3.2.3	Grafana . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>53</b>
	<b>Riferimenti</b>	<b>56</b>

# Capitolo 1

## Tracciatori al Silicio

In questo capitolo sono presentate alcune generalità sui rivelatori di particelle al Silicio. Sono discussi il loro scopo e il loro funzionamento.

Infine si discutono un tipo particolare di tracciatori: i tracciatori al pixel, particolarmente rilevanti per il mio lavoro.

### 1.1 Traccia di una particella

Negli esperimenti di fisica delle alte energie, presso collisori di particelle, si cercano di ricostruire le interazioni verificatesi a seguito di collisioni di due fasci di particelle. Per fare questo si posizionano apparati sperimentali complessi attorno al centro di interazione proprio al fine di misurare le caratteristiche delle particelle uscenti dal centro di interazione.

Per misurare l'energia, l'impulso e la carica delle particelle frutto del centro di interazione primario si misurano l'energia e l'impulso delle particelle che attraversano il rivelatore, prodotti del decadimento delle prime. Come si vede in Figura 1.1, infatti, le particelle che giungono all'apparato di misura non sono necessariamente quelle prodotte nel centro primario di interazione poichè queste potrebbero aver vite medie estremamente brevi.

Una particella carica, sottoposta a un campo magnetico costante, si muove di moto elicoidale. Lo studio di questo moto permette di misurare l'impulso della particella stessa. Per adesso assumiamo di avere a disposizione un tracciatore in grado di rivelare il passag-

gio di una particella carica, senza chiederci il funzionamento specifico di tale dispositivo, che sarà approfondito in seguito.

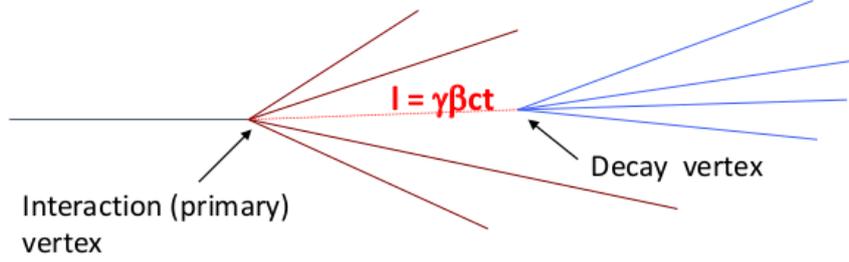


Figura 1.1: Centro di interazione primario e vertice di decadimento di una particella prodotta in un esperimento di collisione.

La traiettoria di una particella carica nel tracciatore permette subito di risalire al suo momento trasverso:

$$p_T = 0.3BR \quad (1.1)$$

dove  $B$  è l'intensità del campo magnetico e  $R$  è il raggio di curvatura della traccia. In un rivelatore si misura solo una parte della traiettoria (qualche punto di passaggio della particella), tuttavia è possibile ottenere il raggio massimo di curvatura misurando la componente sagittale  $s$  della traiettoria rispetto alla corda che collega i due punti della traccia.

Allora la risoluzione nella misura di momento trasverso sarà:

$$\sigma_{pT} = \frac{8p_T^2}{0.3BL^2}\sigma_s \quad (1.2)$$

dove  $L$  è la distanza tra due punti della traccia, che approssima la lunghezza totale percorsa dalla particella, e  $\sigma_s$  è la risoluzione sagittale.

La risoluzione sagittale  $\sigma_s$  dipende dalla risoluzione di posizione del sensore  $\sigma_{r\phi}$ , la quale a sua volta dipende da due componenti sommate in quadratura:

$$\sigma_{r\phi} = \sigma_{riv} \oplus \sigma_{MS} \quad (1.3)$$

dove  $\sigma_{riv}$  è la risoluzione intrinseca del rivelatore e  $\sigma_{MS}$  è una componente dovuta allo scattering multiplo.

La risoluzione dipende quindi dal volume di tracciatura, che è vincolato principalmente

da limiti tecnici e di spesa; dalla risoluzione dei rivelatori stessi, che dipende dalle caratteristiche geometriche di design dei moduli; e dal numero di punti che compongono la misura della traiettoria delle particelle. D'altra parte bisogna tener conto del fatto che aumentando la quantità di dispositivi aumenta la quantità di materiale che la particella attraversa durante il moto: ciò si riflette sull'aumento dell'effetto dovuto allo scattering multiplo (MS). Il MS introduce un errore sulla misura dell'impulso dipendente solo dal materiale attraversato.

Decidere il numero di campionamenti su ogni traiettoria è, alla fine, il risultato di un compromesso tra le due diverse fonti di incertezza:

$$\frac{\Delta p}{p}|_{sag} = \frac{8p\Delta s}{0.3BL^2\cos\theta} \quad (1.4)$$

$$\frac{\Delta p}{p}|_{MS} = \frac{52.8}{B\sqrt{LX_0}\cos\theta} \quad (1.5)$$

Supponiamo, adesso, di voler misurare la distanza  $d_0$  tra una specifica traccia e il vertice ricostruito dalle altre tracce dell'evento. La risoluzione con cui si è in grado di ricostruire il vertice dipende dalle stesse proprietà discusse per il calcolo dell'impulso, cioè dalla geometria del rivelatore e dalla quantità di materia, nonché dall'impulso della particella rivelata.

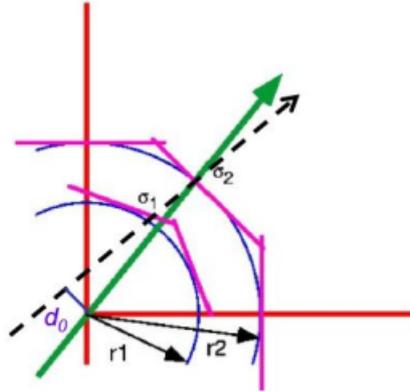


Figura 1.2: Misura di un vertice di decadimento con un apparato a due livelli.

Per semplicità possiamo ipotizzare di avere un rivelatore che complessivamente è formato da due soli punti di misura come in Figura 1.2, allora si avrà:

$$\sigma_{d0} \sim \sqrt{\frac{r_2^2\sigma_1^2 + r_1^2\sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2}} \oplus \frac{r}{p\sin^{3/2}\theta} 13.6[MeV] \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad (1.6)$$

dove  $r_1$  e  $r_2$  sono le distanze dei due strati dal centro,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  sono le risoluzioni spaziali dei due strati,  $\theta$  è l'angolo polare della traiettoria di volo mentre  $r$  è la distanza della traccia dal punto di interazione,  $x$  è lo spessore del rivelatore, infine  $\oplus$  indica la somma in quadratura.

Si vede che l'incertezza è composta da due parti, la prima dipende unicamente dalla geometria del rivelatore e dalla risoluzione intrinseca del detector, la seconda dipende dal MS. Essendo la componente introdotta dal MS indipendente dall'impulso, il termine di incertezza che lo riguarda ha un impatto maggiore per misure a basso impulso. Per minimizzare questo termine è necessario avere rivelatori più prossimi al centro di interazione e più sottili possibile.

## 1.2 Semiconduttori

Nelle applicazioni elettroniche i materiali possono essere distinti in isolanti, conduttori e semiconduttori. La classificazione si può fare usando come parametro di confronto la resistività  $\rho$ .

Generalmente si definiscono isolanti tutti i materiali con alta resistività ( $\geq 10^3 \Omega \cdot m$ ) mentre si definiscono conduttori i materiali con resistività molto bassa ( $\sim 10^{-5} \Omega \cdot m$ ). I semiconduttori sono la terza classe di materiali, per i quali la resistività assume valori compresi tra quelli precedenti.

Una proprietà interessante che distingue i materiali nelle tre categorie è l'ampiezza della banda proibita, cioè la distanza energetica che separa la banda di conduzione dalla banda di valenza di un solido cristallino costituito dal materiale in esame.

La natura fermionica degli elettroni li vincola al principio di Pauli, che implica che questi si distribuiscano nei livelli energetici secondo la distribuzione di Fermi Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{k_b T}\right)} \quad (1.7)$$

dove  $E$  è l'energia dello stato occupato dagli elettroni,  $E_f$  è l'energia di Fermi,  $T$  è la temperatura e  $k_b$  la costante di Boltzmann. La struttura a bande per conduttori, semiconduttori e isolanti è rappresentata schematicamente in Figura 1.3.

I livelli ammessi per gli elettroni, nei solidi, sono divisi in due bande energetiche: la

banda di valenza, che contiene gli elettroni fautori del legame tra gli atomi del solido, e la banda di conduzione, che contiene elettroni liberi e delocalizzati su tutto il volume del cristallo.

Le due bande, generalmente, sono divise da un gap energetico che definisce la banda proibita, cioè una banda energetica completamente assente di livelli accessibili agli elettroni. L'ampiezza della banda proibita, o alternativamente, l'energia di separazione tra banda di conduzione e banda di valenza, caratterizza conduttori, semiconduttori e isolanti in modo analogo alla resistività.

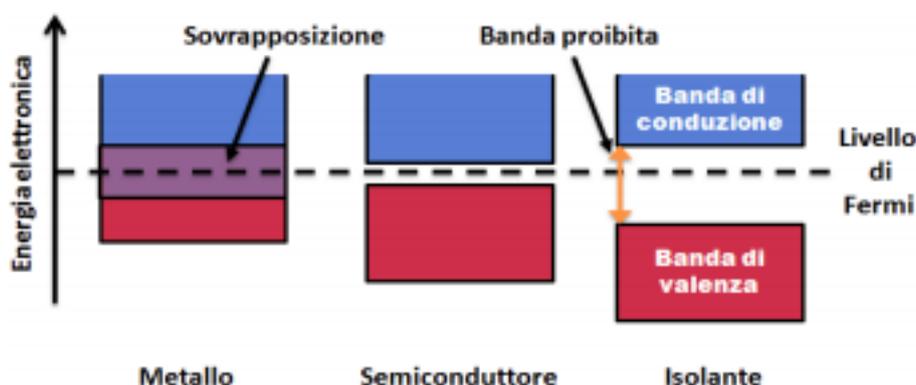


Figura 1.3: Bande energetiche per i tre tipi di materiale.

Come si vede in Figura 1.3 i materiali metallici sono caratterizzati da una sovrapposizione delle due bande energetiche mentre i materiali isolanti hanno un'ampia banda proibita che separa le due bande di livelli energetici ammessi, dell'ordine di qualche decina di  $eV$ . I materiali semiconduttori hanno una separazione energetica tra le due bande ridotta, dell'ordine di qualche  $eV$ : ad esempio il Silicio (Si) ha una energia di separazione  $E_g$  di circa  $1.12 eV$ , a temperatura ambiente.

Grazie alla sua abbondanza e alle sue caratteristiche il Silicio è il semiconduttore più utilizzato per apparati microelettronici. Il Silicio ha 4 elettroni di valenza coi quali si può legare agli atomi vicini all'interno di un reticolo, come si vede in Figura 1.4.

Secondo la statistica di Fermi-Dirac a temperatura  $0 K$  gli elettroni del semiconduttore sono tutti nello stato di riposo e, a causa del gap tra la banda di conduzione e quella

di valenza, nessun elettrone è libero di muoversi nel reticolo. D'altra parte a temperature maggiori il reticolo cristallino guadagna energia termica che può essere usata per permettere a qualche elettrone di passare alla banda di conduzione.

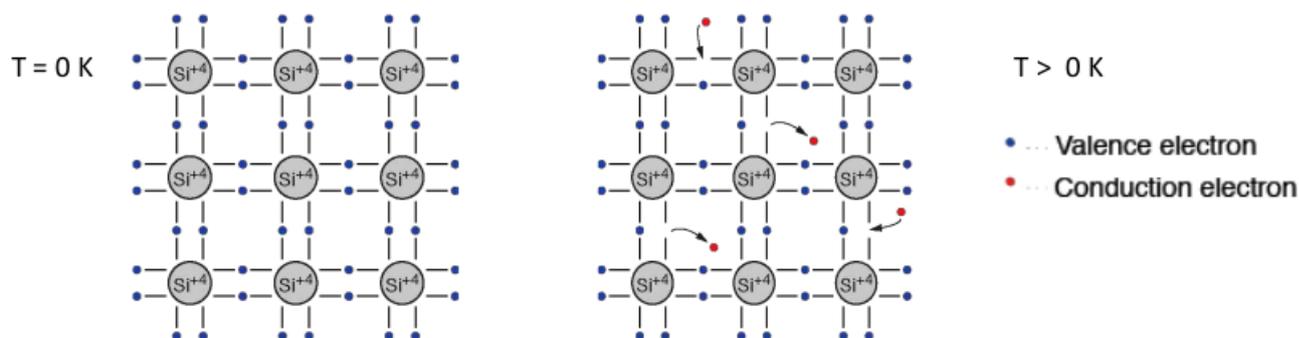


Figura 1.4: Legame covalente formatosi in un reticolo di soli atomi di Silicio.

La rottura del legame covalente produce una coppia di cariche mobili di segno opposto. La prima carica mobile è l'elettrone stesso che dalla banda a energia più alta può partecipare alla conduzione; la seconda è la lacuna lasciata dall'elettrone nella banda di valenza: questa può essere trattata a tutti gli effetti come una particella di carica positiva. Si definisce concentrazione intrinseca  $n_i$  la densità di elettroni liberi:

$$n_i = T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2k_b T}\right) \quad (1.8)$$

la quale dipende tanto dalla temperatura quanto dal materiale in esame (per la presenza di  $E_g$  all'esponente).

### 1.2.1 Drogaggio di semiconduttori

In un semiconduttore puro le cariche eccitate dal passaggio di una particella sono in netta minoranza rispetto alla concentrazione di carica intrinseca, questo rende i semiconduttori puri inadatti a molte applicazioni.

Se si prova a calcolare il rapporto segnale-rumore di un Silicio puro attraversato da una particella carica come il rapporto tra l'energia media ceduta al Silicio dalla particella  $dE/dx \cdot d$  e l'energia di ionizzazione media  $I_0$  si ha:

$$\frac{dE/dx \cdot d}{I_0} = \frac{3.87 \cdot 10^6 \text{ eV/cm} \cdot 0.03 \text{ cm}}{3.62 \text{ eV}} \sim 3.2 \cdot 10^4 e^-h^+ \text{ - pairs} \quad (1.9)$$

Mentre la carica intrinseca a temperatura ambiente nello stesso volume di semiconduttore può essere espressa come:

$$n_i dA = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot 1 \text{ cm}^2 = 4.35 \cdot 10^8 e^- h^+ - \text{pairs} \quad (1.10)$$

Dal confronto tra i risultati si vede come in un semiconduttore puro la carica dovuta all'eccitazione termica è di quattro ordini di grandezza superiore a quella dovuta alla ionizzazione per il passaggio di una particella carica.

Al fine di modificare le proprietà elettriche di un materiale semiconduttore lo si può sottoporre a un processo di drogaggio, cioè all'inserimento nel reticolo di alcune impurità [1]. A questo punto è possibile separare i semiconduttori in due categorie:

- **semiconduttori intrinseci** cioè semiconduttori puri, che non presentano impurità nel reticolo. Tutta la carica libera è dovuta all'eccitazione termica di elettroni che riescono a passare alla banda di conduzione. Il Silicio a  $T = 300 \text{ K}$  presenta  $n_i \sim 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ;
- **semiconduttori estrinseci** cioè semiconduttori nel cui reticolo sono stati inseriti atomi di tipo diverso per modificare il numero di portatori liberi di carica.

Considerando i semiconduttori estrinseci, e valutando il Silicio come esempio, è possibile operare due tipi diversi di drogaggio:

- **drogaggio n** dove gli atomi che sono inseriti nella struttura cristallina sono pentavalenti (es: Fosforo) così che si abbia un elettrone libero a seguito dei legami covalenti con gli atomi di Silicio circostanti. Si rende disponibile un livello energetico vicino alla banda di conduzione in modo da ridurre l'energia necessaria a questi elettroni per passare nella banda di conduzione.

Le impurezze di questo tipo sono dette atomi donatori e la loro concentrazione è definita come  $N_D$ ;

- **drogaggio p** dove gli atomi che sono inseriti nella struttura cristallina hanno valenza minore di quelli che compongono il reticolo normalmente (es: Boro). In questo caso si ha la formazione di un livello energetico poco sopra la banda di valenza dove gli elettroni possono saltare andando a creare una lacuna, la quale

può partecipare alla conduzione spostandosi attraverso processi di ricombinazione con altri elettroni, come si vede in Figura 1.5.

Le impurezze di questo tipo sono dette atomi accettori e la loro concentrazione è definita come  $N_A$ .

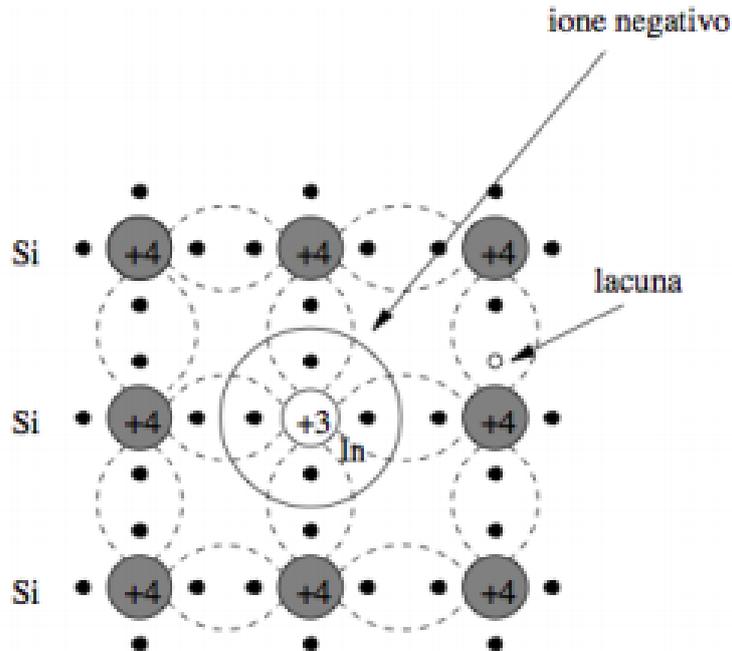


Figura 1.5: Legami covalenti di un reticolo di Silicio con all'interno un atomo accettore.

## 1.2.2 Correnti nei semiconduttori

In un semiconduttore, alla conduzione possono partecipare tanto gli elettroni quanto le lacune.

In un semiconduttore si possono sviluppare delle correnti di carica applicando un campo elettrico in modo analogo a quanto avviene nei metalli. Oppure in caso di differenti concentrazioni di drogaggio si possono avere correnti di diffusione simili a quelle osservate alle giunzioni di conduttori di tipo diverso.

Applicando un campo elettrico piccolo (low level injection condition)  $\vec{e}$  si ha che la velocità delle lacune e degli elettroni, i quali si muoveranno verso capi opposti, è definibile

attraverso il parametro mobilità  $\mu_n$  e  $\mu_p$ :

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{\epsilon} \quad (1.11)$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \vec{\epsilon} \quad (1.12)$$

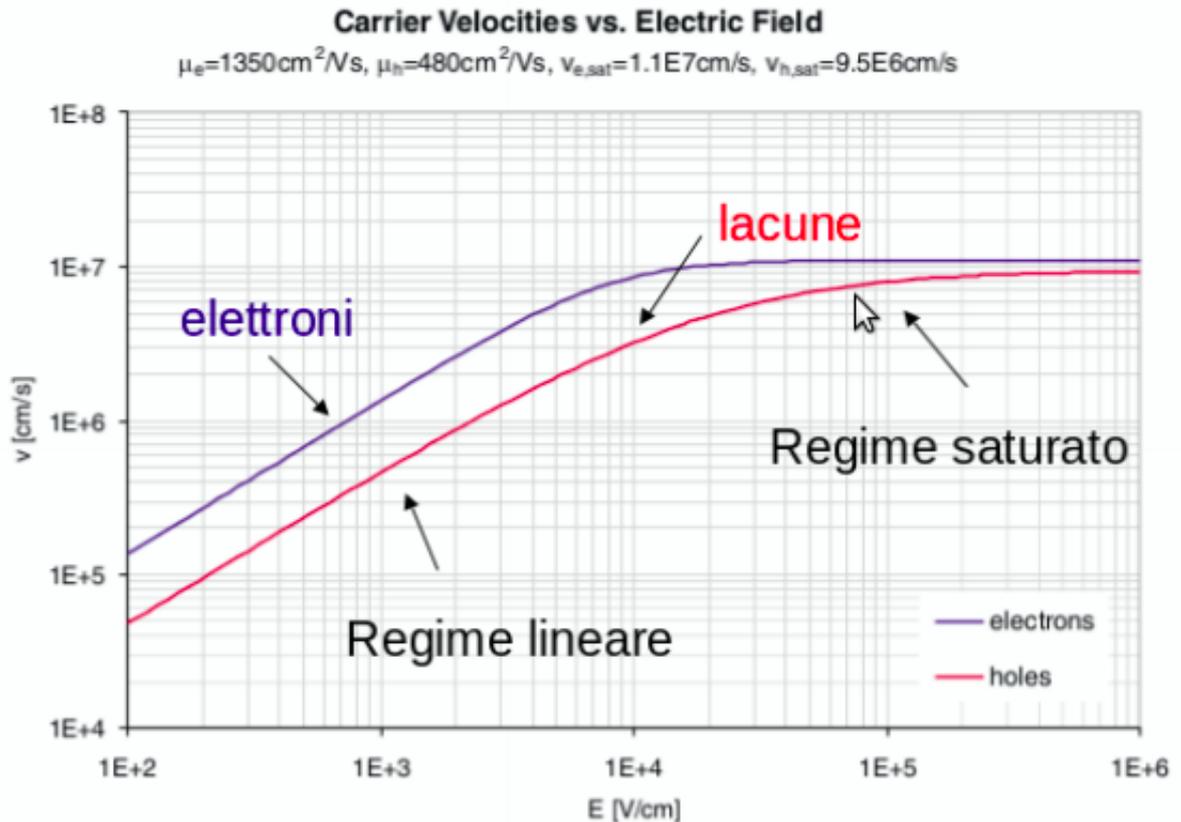


Figura 1.6: Andamento della velocità dei portatori di carica in funzione del campo elettrico esterno.

Nel caso di campi elettrici elevati la velocità dei portatori di carica cresce progressivamente fino ad un punto di saturazione oltre il quale resta approssimativamente costante come si vede in Figura 1.6.

La mobilità dei portatori di carica varia da materiale a materiale. Inoltre elettroni e lacune hanno generalmente mobilità differenti tra loro, nel caso del Silicio i valori sono  $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/Vs$  e  $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/Vs$ .

Complessivamente si definiscono le correnti di deriva per tipo di portatori di carica:

$$\vec{j}_n^{der} = qn\mu_n \vec{\epsilon} \quad (1.13)$$

$$\vec{j}_p^{der} = qp\mu_p\vec{\epsilon} \quad (1.14)$$

e la corrente di deriva totale:

$$\vec{j}_T^{der} = \vec{j}_n^{der} + \vec{j}_p^{der} = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{\epsilon} = \sigma\vec{\epsilon} \quad (1.15)$$

dove  $n$  e  $p$  sono le concentrazioni di portatori di carica liberi dei due tipi,  $\sigma$  è la conducibilità (il reciproco della resistività).

Supponiamo adesso di avere un materiale il cui drogaggio non sia distribuito uniformemente su tutto il proprio volume. Le cariche libere tenderanno a muoversi da regioni ad elevata concentrazione a quelle a concentrazione minore dando luogo a una corrente di diffusione calcolabile con la prima equazione di Fick:

$$\vec{j}_n^{diff} = qD_n\vec{\nabla}n \quad (1.16)$$

$$\vec{j}_p^{diff} = -qD_p\vec{\nabla}p \quad (1.17)$$

dove  $D_n$  e  $D_p$  sono i coefficienti di diffusione delle lacune.

I coefficienti di diffusione, tanto come i coefficienti di mobilità, sono caratteristiche di natura statistica le quali non sono indipendenti l'una dall'altra. Sono messe in relazione dalla relazione di Einstein:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = V_T \quad (1.18)$$

dove  $V_T$  è l'equivalente in Volt della temperatura.

### 1.3 Giunzione P-N

Il contatto tra due semiconduttori drogati diversamente dà luogo a una struttura chiamata giunzione p-n.

La differenza di concentrazione di carica libera provoca un moto di diffusione per cui gli elettroni nella zona drogata n si muoveranno verso la zona drogata p, e viceversa le lacune in p, così da permettere, una volta passata la zona di contatto, alle cariche mobili di ricombinarsi. In questo modo si crea una zona priva di cariche libere, detta zona di svuotamento. All'equilibrio il campo creato da elettroni e lacune impedisce il movimento di altre cariche, interrompendo il moto di diffusione.

La giunzione p-n si può dividere in quattro zone come si vede in Figura 1.7: una a drogaggio p e carica complessiva nulla, una parte della zona di svuotamento penetrata nel semiconduttore drogato p a carica complessiva negativa, una parte della zona di svuotamento penetrata nel semiconduttore drogato n a carica complessiva positiva e una zona neutra di semiconduttore drogato n.

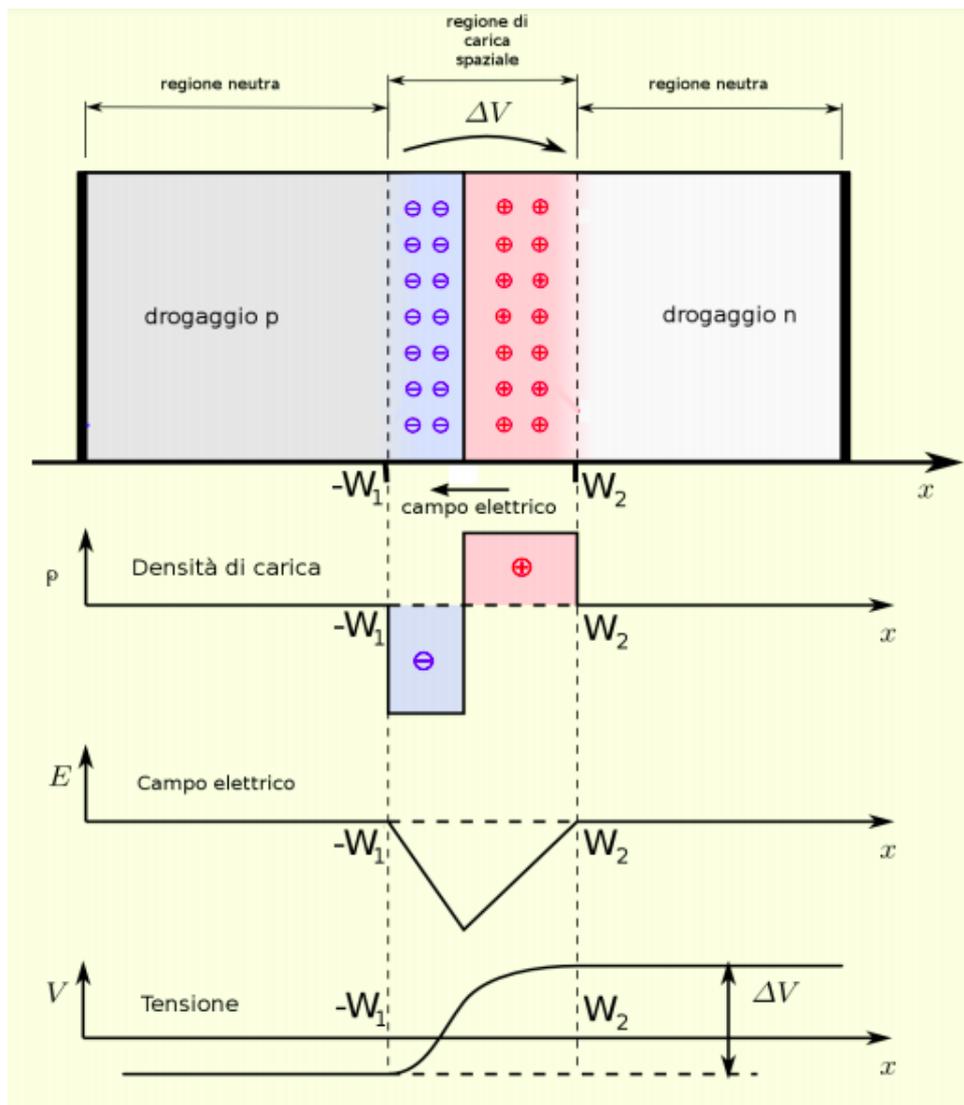


Figura 1.7: Giunzione p-n e andamento spaziale delle caratteristiche del sistema.

Assumendo che la densità di carica sia nulla ovunque eccetto che nella zona di svuotamento e costante non nulla nella zona di svuotamento (a meno del salto a cavallo della giunzione) si può calcolare il campo elettrico con l'equazione di Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\epsilon} = \frac{\rho}{\epsilon_s} \quad (1.19)$$

$$\epsilon(x) = \frac{\rho}{\epsilon_s}(x - x_p) \quad (1.20)$$

Il potenziale elettrico sarà l'inverso dell'integrale del campo elettrico, per cui si può trovare il potenziale di contatto, cioè il potenziale che viene raggiunto ai capi della giunzione e che permette l'arresto dei moti di diffusione:

$$V_0 = V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (1.21)$$

dove ci si riferisce a  $N_D$  e  $N_A$  rispettivamente come la concentrazione di donatori nel Silicio drogato n, e la concentrazione di accettori nel Silicio drogato p.

Un'altra caratteristica che si calcola facilmente è l'ampiezza della zona di svuotamento:

$$W = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0} \quad (1.22)$$

da cui si vede che la zona di svuotamento tende a penetrare più nei semiconduttori poco drogati rispetto a quelli con una concentrazione di drogaggio maggiore.

### 1.3.1 Polarizzazione inversa e corrente di buio

Le considerazioni precedenti, a riguardo dell'equilibrio raggiunto dal sistema, sono state fatte tutte assumendo che la giunzione fosse isolata dall'esterno. Applicando una differenza di potenziale esterna, infatti, il comportamento della giunzione cambia radicalmente.

La polarizzazione inversa è il risultato dell'applicazione di una differenza di potenziale ove il polo negativo è applicato alla regione p, il polo positivo alla regione n, come si vede in Figura 1.8. I portatori di carica maggioritari, nei due semiconduttori, saranno attratti dal polo a loro adiacente; la tensione di interdizione del moto diffusivo e l'ampiezza della zona di svuotamento, aumentano. Posto  $V_R$  tensione di polarizzazione inversa si ha:

$$V = V_R + V_0 \quad (1.23)$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_R + V_0)} \quad (1.24)$$

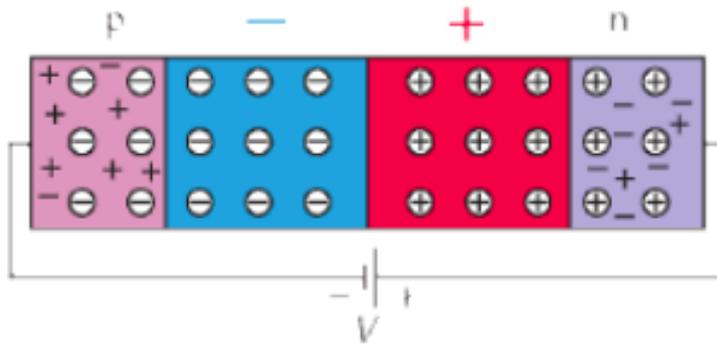


Figura 1.8: Polarizzazione inversa di una giunzione p-n

Una giunzione p-n sottoposta a polarizzazione inversa, a temperatura diversa da 0 K, è attraversata da una corrente molto piccola, ma non nulla.

Da ciascun semiconduttore, infatti, vi sarà una piccola migrazione di cariche minoritarie verso l'altro. Questa corrente è chiamata corrente di buio (leakage current) ed è definita dall'equazione del diodo ideale come:

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{qV}{k_b T}\right) - 1 \right) \quad (1.25)$$

che mostra come la corrente di leakage dipenda fortemente dall'energia cinetica delle cariche minoritarie, e quindi dalla temperatura della giunzione.

Le cariche che compongono la corrente di buio derivano principalmente dalla formazione di coppie lacuna-elettrone all'interno della zona di svuotamento per eccitazione termica. Per i rivelatori a semiconduttore la corrente di buio è una sorgente di rumore ineludibile: è una corrente all'incirca costante nel tempo che cresce al crescere della temperatura.

Per abbattere la corrente di buio si mantiene la temperatura dei rivelatori molto bassa con dei sistemi di raffreddamento.

### 1.3.2 Capacità intrinseca

Le giunzioni p-n sono anche caratterizzate da una capacità intrinseca, definita dal rapporto tra la carica immagazzinata e la differenza di potenziale applicata ai capi della giunzione.

La capacità di un rivelatore è molto importante nella valutazione della sua risposta in

tempo.

Se una giunzione p-n ha un drogaggio fortemente asimmetrico  $N_A \ll N_D$  la zona di svuotamento sarà quasi completamente situata nel Silicio drogato p. Allora si può calcolare la carica mantenuta nella zona di svuotamento  $Q$  e la tensione ai capi della giunzione  $V$ :

$$Q = eN_AAW \quad (1.26)$$

$$V = eN_AW^2/2\varepsilon_s \quad (1.27)$$

dove  $A$  è la superficie della zona di svuotamento. Segue il calcolo della capacità intrinseca:

$$C = \frac{Q}{V} = 2\varepsilon_s \frac{A}{W} = \sqrt{\frac{\mu\rho}{2\varepsilon_s A^2} (V_0 - V_B)^{-1}} \quad (1.28)$$

dove  $\mu$  è la mobilità dei portatori di carica,  $\rho$  è la densità di portatori di carica.

## 1.4 Rivelatori al silicio

### 1.4.1 Interazione radiazione materia

Il passaggio di una particella attraverso un mezzo può dar luogo a diversi fenomeni osservabili; in particolare, come introdotto in precedenza, si è interessati a capire come si possano rivelare le traiettorie di particelle cariche immerse in un campo magnetico.

I due principali effetti dell'interazione tra una particella e uno spessore di materiale sono la cessione di energia, dalla particella al materiale, e la deflessione della traiettoria della particella.

Una particella carica che attraversa un materiale può essere rivelata attraverso la sua interazione con il materiale stesso. In particolare, nel caso dei rivelatori al Silicio, si è interessati all'energia rilasciata attraverso processi di ionizzazione, da parte della particella carica, di atomi nel reticolo del materiale.

L'energia media ceduta da una particella incidente ad un materiale è quantificata dall'equazione di Bethe-Bloch [2]:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \left( \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right) \quad (1.29)$$

i cui parametri sono sommariamente descritti nella Tabella 1.1.

L'equazione di Bethe-Bloch appare piuttosto complessa, tuttavia rivela alcune interessanti proprietà dell'interazione particella-materia anche senza che si vada nel particolare

di ciascuno dei suoi termini. Ad esempio si vede che l'energia ceduta, mediamente, non dipende dalla massa della particella incidente, ma solo dalla sua carica e dalla sua velocità. Allora un fascio di particelle con la stessa carica cederanno energia al materiale solo in base alla loro velocità.

$r_e$	il raggio dell'elettrone;
$m_e$	la massa dell'elettrone;
$c$	la velocità della luce;
$N_A$	il numero di Avogadro;
$Z$	il numero atomico del materiale attraversato;
$A$	il numero di massa del materiale attraversato;
$z$	la carica della particella incidente;
$\beta = v/c$	il parametro relativistico della particella;
$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$	il fattore di Lorentz;
$W$	l'energia massima trasferibile in una singola interazione;
$I$	energia di ionizzazione del materiale;
$\delta$	correzione per effetti di densità;
$C$	correzione per la schermatura degli elettroni atomici.

Tabella 1.1: Parametri dell'equazione di Bethe-Bloch

### 1.4.2 Rivelatori a stato solido

Ora possiamo concentrarci sul funzionamento di un rivelatore a stato solido costituito da un semiconduttore, descritto anche in Figura 1.9. L'energia rilasciata da una particella che attraversa il sensore fa sì che si producano coppie elettrone-lacuna, le quali vengono accelerate verso gli elettrodi per effetto della differenza di potenziale.

Nel caso di una giunzione polarizzata inversamente la zona di svuotamento si comporta come una camera a ionizzazione. La zona di svuotamento, infatti, è priva di cariche libere, a meno di quelle che partecipano alla corrente di buio.

L'energia rilasciata dalla particella incidente viene assorbita dal reticolo, producendo

coppie elettrone-lacuna che, accelerate dal campo elettrico applicato alla giunzione, producono una corrente misurata sugli elettrodi.

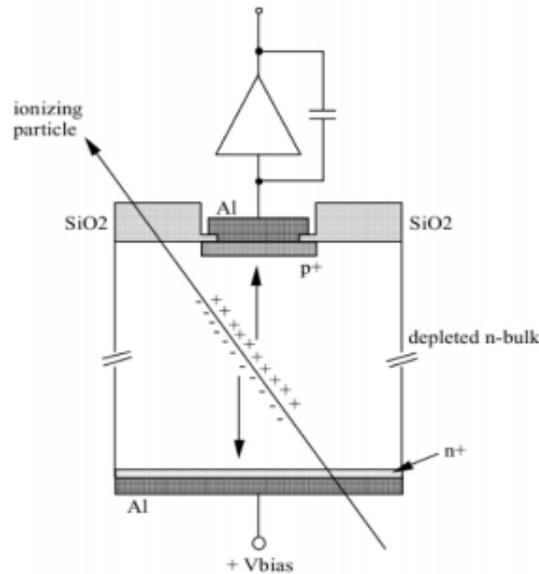


Figura 1.9: Rivelatore al Silicio attraversato da una particella carica.

Come abbiamo visto nelle sezioni precedenti una giunzione p-n si comporta in modo simile ad un condensatore a facce piane di capacità  $C$  a cui è applicata una tensione  $V_B$ . Quando gli elettroni prodotti per ionizzazione vengono attratti dal catodo si osserva una variazione nella tensione ai capi della giunzione.

Si ha che:

$$\Delta E(x) = Nq \int_{x_0}^x \vec{E} d\vec{l} = -Nq \int_{V(x_0)}^{V(x)} dV(x) = Nq \frac{x - x_0}{d} V_B \quad (1.30)$$

dove  $\Delta E$  è l'energia di ionizzazione ceduta dalla particella incidente, e si è sostituito nell'ultimo passaggio  $V(x) = \frac{W-x}{W} V_B$ .

In analogia con un condensatore si ha che l'energia rilasciata dalla particella incidente viene accumulata:

$$\Delta E_C \sim CV_B \Delta V \sim \Delta E \quad (1.31)$$

per cui il segnale indotto dal moto degli elettroni è:

$$\Delta V_e = -\frac{Nq}{Cd} (x - x_0) = -\frac{Nq}{Cd} vt \quad (1.32)$$

Una trattazione simile può essere riservata alle lacune (che si differenziano dagli elettroni per il valore di mobilità).

Il problema di voler utilizzare entrambi i portatori di carica è, per l'appunto, che le lacune hanno una velocità inferiore a quella degli elettroni in un semiconduttore. Questo comporta che il tempo di integrazione del segnale prodotto da entrambe le cariche è molto più lungo e il rivelatore ha un tempo morto maggiore.

Per tagliare i segnali dovuti all'arrivo delle lacune all'elettrodo si può applicare un circuito smorzatore RC tale che il tempo caratteristico sia molto superiore al tempo di moto degli elettroni verso l'elettrodo, ma inferiore al tempo di moto delle lacune. Infine si ha:

$$\Delta V(t) = -\frac{Nq}{Cd}(v_n t + v_p RC(1 - \exp(-t/RC))) \quad (1.33)$$

### 1.4.3 Rivelatori a pixel

Un tipo di rivelatore al Silicio è il rivelatore a pixel [3]. La geometria a pixel è costituita da elettrodi di piccola superficie indipendenti tra loro. Ciascun pixel è una unità attiva del sensore e permette di misurare il passaggio di una particella con buona risoluzione in due dimensioni.

In un esperimento di collisione, come a LHC, le particelle vengono prodotte tutte nella zona di interazione dei due fasci, e si propagano verso l'esterno. Il flusso di particelle diminuisce con l'aumentare della distanza dal centro di interazione ( $\sim \frac{1}{R^2}$ ). Per la misura dei vertici secondari, ad esempio nell'esperimento ATLAS [4], è necessario avvicinare il primo layer del detector più possibile alla zona di interazione, dove il flusso di particelle è più elevato. Per far fronte alle ambiguità legate all'uso di elettrodi continui è necessario utilizzare detector a pixel.

Esistono due famiglie costruttive di rivelatori a pixel, rispettivamente la famiglia di rivelatori ibridi e la famiglia di rivelatori MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors), o monolitici.

I rivelatori a pixel ibridi sono frutto della sovrapposizione di due strati, uno preposto alla rivelazione, essenzialmente composto dal sensore che genera il segnale elettrico, e l'altro preposto alla lettura del segnale (strato di read-out). Le parti, costruite separatamente, vengono poste in contatto elettrico tramite la tecnica del bump-bonding, come si vede

in Figura 1.10: sono tenute assieme da delle fini saldature con delle sferette conduttrici di diametro dell'ordine di  $10 \mu m$ .

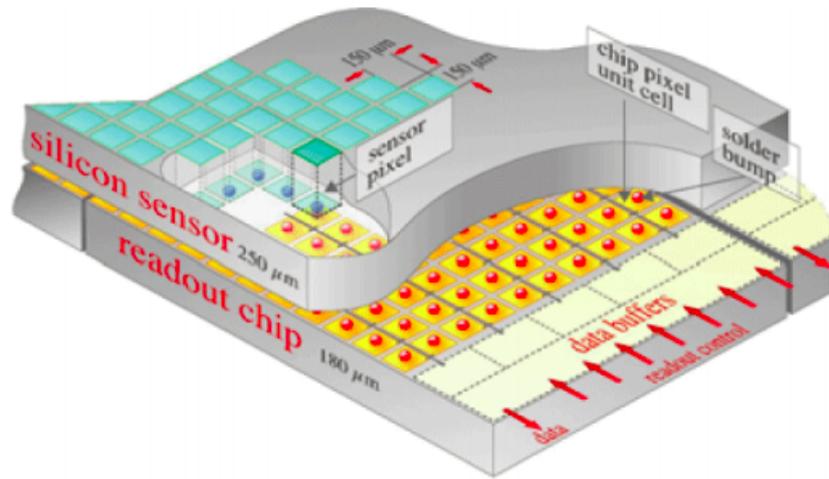


Figura 1.10: Rivelatore a pixel ibrido, sono ben visibili i due substrati uniti.

Dal punto di vista pratico i rivelatori a pixel ibridi tendono ad avere una buona robustezza alla radiazione, cosa che li rende ideali per essere usati in esperimenti ad alte energie. La controindicazione maggiore all'utilizzo di rivelatori a pixel ibridi, è il costo della tecnologia ancora molto alto.

I rivelatori a pixel monolitici, invece, sono composti da un unico strato che contiene tanto la parte di rivelazione, quanto quella di lettura. Questa prima caratteristica permette di avere rivelatori più sottili, riducendo lo scattering multiplo. Tuttavia integrare sullo stesso substrato di Silicio sia il sensore che l'elettronica rende complicato il design e costosa la produzione.

Poichè ITK prevede l'utilizzo solo dei sensori ibridi approfondiamo la trattazione di questi ultimi.

Il substrato di rivelazione è composto da un semiconduttore tipicamente drogato  $n$  sul quale viene posto un secondo semiconduttore drogato  $p^+$ . A causa dello squilibrio di drogaggio si può assumere che lo svuotamento sia interamente contenuto nel semiconduttore drogato  $n$ . All'altro capo del semiconduttore debolmente drogato  $n$  si pone un semiconduttore drogato  $n^+$  al fine di avere un contatto ohmico con l'elettrodo che vi sarà applicato, così che non sia interdetto il passaggio di carica dal metallo al semiconduttore.

Si polarizza la giunzione applicando, con dei contatti metallici, alle due parti drogate di giunzione una tensione di polarizzazione inversa. La tensione di lavoro è scelta in modo da garantire il completo svuotamento dello strato epidassiale, cioè lo strato tra i due elettrodi, così da rendere sensibile all'attraversamento della particella tutto il volume del sensore. Il chip di readout è connesso a uno degli elettrodi attraverso il metodo del bump-bond.

# Capitolo 2

## Inner Tracker dell'esperimento

### ATLAS

In questo capitolo viene descritto il progetto ITK, nel cui contesto si è svolto il presente lavoro.

Sono discussi il layout e le performance previste per il nuovo tracciatore e i test che sono svolti sui moduli durante la costruzione del detector.

Il lavoro inerente a questa tesi prende posto nella fase di caratterizzazione dei moduli di rivelazione che comporranno il futuro tracciatore, per questo si pone l'accento sui processi di costruzione e caratterizzazione di questi dispositivi.

## 2.1 HL-LHC e i motivi dell'upgrade ITK

Dopo la scoperta del bosone di Higgs [5] è diventato cruciale poterne studiare le proprietà, oltre a studiare processi rari per la fisica oltre il Modello Standard (SM). Per farlo LHC [6, 7] prevede un potenziamento volto ad aumentare la quantità di dati raccolti. In particolare verranno apportati dei miglioramenti all'acceleratore per poter raggiungere un rate di eventi 10 volte maggiore di quello attuale.

### 2.1.1 Luminosità

Uno dei parametri più importanti per un acceleratore di particelle è la luminosità istantanea, cioè il numero di eventi che possono essere prodotti dall'acceleratore per unità di

tempo.

Si può scrivere il numero di eventi prodotti da un collisore come:

$$\sigma L = \frac{dN}{dt} \quad (2.1)$$

dove  $L$  è la luminosità istantanea della macchina,  $\sigma$  la sezione d'urto totale dell'interazione protone-protone.

La luminosità può essere anche espressa in funzione delle proprietà dei fasci del collisore, secondo la formula:

$$L = \frac{\mu f N_b}{\sigma} \quad (2.2)$$

dove  $N_b$  è il numero di pacchetti di protoni che compongono il fascio di particelle,  $f$  è la frequenza di rotazione del fascio di particelle nel circuito dove vengono accelerate,  $\sigma$  è la sezione d'urto totale e  $\mu$  è il pile-up, cioè il numero di interazioni protone-protone che avvengono per ogni incrocio di due pacchetti di protoni.

Data la grande sezione d'urto per i protoni alle energie previste da LHC ( $\sim 110 \text{ mb}$ ) quando due pacchetti di particelle attraversano la zona di interazione saranno molti gli urti tra protoni dei pacchetti. Spesso solo un evento è considerato interessante ai fini dell'analisi offline, gli altri eventi sono definiti come eventi di pile-up. La luminosità quantifica il numero di eventi interessanti che il collisore è in grado di produrre, cioè la statistica che si ha a disposizione durante le analisi dati. Con l'aumento della luminosità anche il rate di eventi di pile-up è destinato a salire da  $\mu \sim 50$  a  $\mu \sim 200$ .

La presenza di tante collisioni, e la conseguente produzione di particelle cariche e neutre, fa sì che il tracciatore ITK debba poter registrare un numero molto elevato di tracce con poco tempo morto, e che debba poter resistere ai grandi flussi di radiazione.

RUN2, cioè il periodo di funzionamento di LHC compreso tra gli anni 2015 e 2018, come si vede anche in Figura 2.1, ha concluso la sua attività con una luminosità totale di circa  $150 \text{ fb}^{-1}$ , mentre al termine di RUN3 (2025) ci si aspetta di raggiungere una luminosità totale di  $300 \text{ fb}^{-1}$ . A seguito del passaggio ad HL-LHC ci si aspetta, tra il 2027 e il 2035, di raggiungere una luminosità integrata di  $3000 \text{ fb}^{-1}$ .

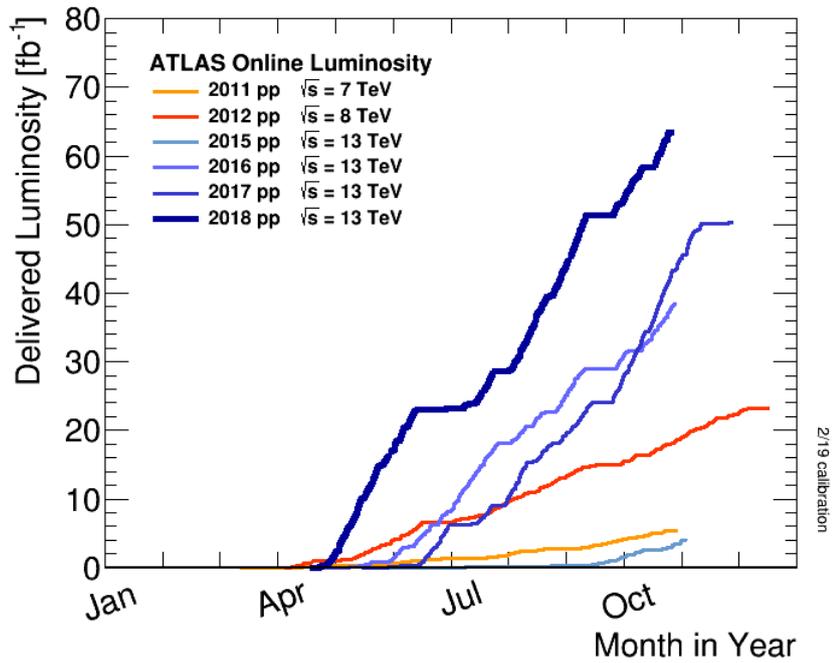


Figura 2.1: Luminosità integrata durante le operazioni di LHC negli anni [8].

### 2.1.2 L'attuale tracciatore: Inner Detector

Il tracciatore interno di ATLAS, rappresentato in Figura 2.2, ha una struttura cilindrica lunga 6.2 m e di raggio 1.05 m e compone lo strato più interno del rivelatore.

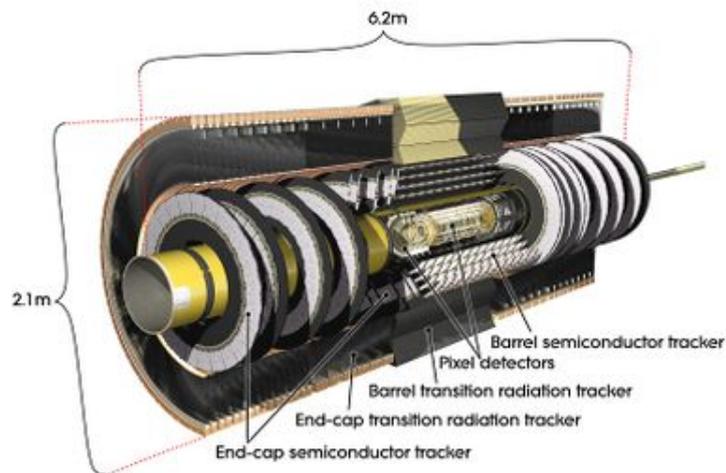


Figura 2.2: Rappresentazione in sezione del tracciatore interno ID di ATLAS, il quale sarà sostituito da ITK.

Presso il vertice di interazione sono posti quattro strati di rivelatori a pixel di Silicio: durante RUN1 (2009-2013) la parte interna del tracciatore era composta da tre strati di rivelatori a pixel, prima di RUN2 (2015-2018) ne è stato aggiunto un quarto [9].

ITK prevede la presenza di sei strati di rivelatori a pixel di Silicio, nei suoi strati più interni.

Successivamente, verso l'esterno di ID, si hanno otto strati di rivelatori a strip al Silicio: dei rivelatori di Silicio con una risoluzione molto alta in una sola delle due direzioni del piano su cui sono disposti.

All'esterno dei rivelatori di Silicio si trova un tracciatore a gas (Xeno 70%, anidride carbonica 27%, ossigeno 3%) noto come Transition Radiation Detector: in questo caso è il gas, chiuso in delle camere a deriva tubolari, ad essere ionizzato dal passaggio di una particella carica.

ITK prevede che i suoi strati più esterni contengano otto strati di rivelatori a strip di Silicio.

### 2.1.3 Il problema del danno da radiazione

Come detto nella sezione 2.1.1 e mostrato nella Figura 2.3 l'aumento di luminosità previsto per HL-LHC comporterà un flusso di particelle molto più alto rispetto a quello misurato nella configurazione attuale.

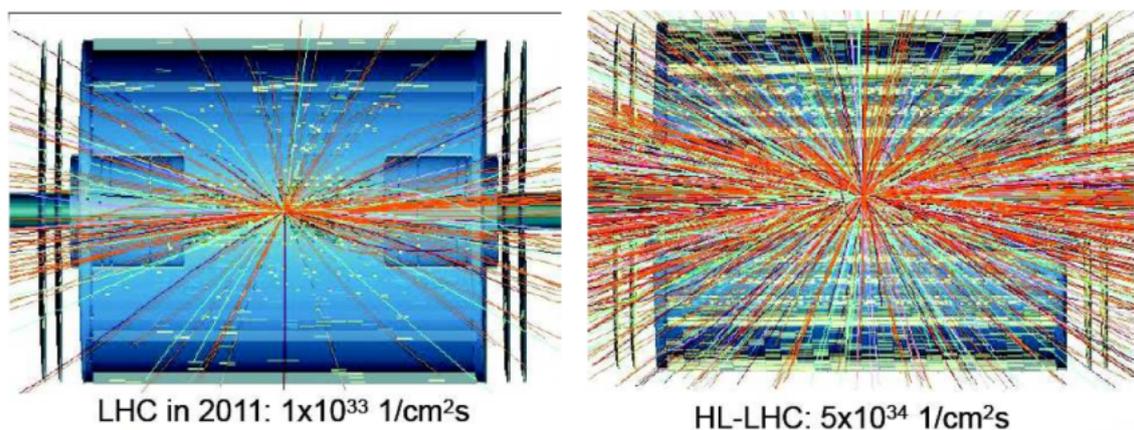


Figura 2.3: Simulazioni dei risultati del tracciatore di ATLAS al lavoro su LHC con le performance del 2011 (SX) e con le performance che saranno raggiunte con HL-LHC (DX).

Per far fronte all'elevata molteplicità di tracce cariche, e all'aumento del flusso degli adroni negli strati interni del tracciatore, ITK rispetto a ID deve offrire:

- aumento della granularità, cioè un aumento del numero di sensori per unità di superficie, in modo da evitare che due tracce passino per lo stesso volume di rivelazione;
- aumento della robustezza alla radiazione, per garantire la funzionalità del detector per tutta la durata della presa dati, senza compromettere l'efficienza di rivelazione.

Vale la pena di spendere qualche parola sui problemi del danno da radiazione.

Il danno da radiazione dipende dal flusso di particelle (in particolare adroni) cariche, e non, che attraversano il rivelatore. Il flusso di particelle è proporzionale al rate di interazione, cioè il numero di interazioni che avvengono al secondo ( $10^9/s$  in LHC) e quindi alla luminosità della macchina.

Le particelle che attraversano un semiconduttore possono:

- interagire con gli elettroni del Silicio che compone il sensore, generando effetti temporanei e non problematici;
- interagire con gli atomi del reticolo del sensore. La modifica del reticolo compromette le caratteristiche del cristallo di Silicio, sia modificando la densità del drogaggio, sia creando distorsioni nel reticolo cristallino che pregiudicano la trasmissione di carica.

I danni più gravi subiti dal sensore sono i dislocamenti degli atomi del Silicio che compone la parte attiva del sistema, questi difetti creano dei livelli di energia anomali nel reticolo e possono produrre effetti diversi.

Possono indurre una variazione ai livelli di drogaggio che provoca una variazione della tensione di svuotamento, cioè la tensione che massimizza l'ampiezza della zona di svuotamento nella giunzione p-n.

Le alterazioni del reticolo possono far sì che si creino dei livelli energetici anomali che intrappolano i portatori di carica, riducendo il numero di portatori di carica liberi che compongono il segnale.

Infine, se i livelli creati dai danni di radiazione sono a energie comprese nella banda

proibita, si ha che l'effetto del danno è principalmente quello di aumentare la corrente di leakage, rendendo più facile l'eccitazione termica degli elettroni nel reticolo. A questo proposito in Figura 2.4 si vede come la corrente di leakage aumenti linearmente con il flusso di particelle:

$$\frac{\Delta I}{V_{ol}} = \alpha \cdot \phi_{eq} \quad (2.3)$$

dove  $\alpha$  è chiamato rate di danneggiamento attuale; esso dipende dalla temperatura di operazione e dal tempo che trascorre il materiale sotto lo stress delle radiazioni.

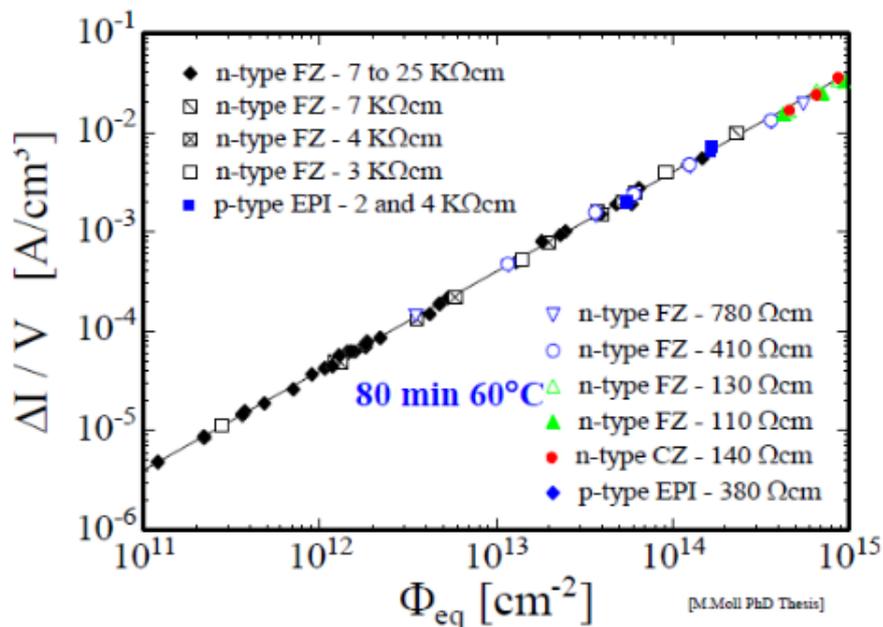


Figura 2.4: Aumento della corrente di leakage a causa della esposizione a un flusso di particelle per 80 minuti a temperatura 60 °C.

## 2.2 Il tracciatore di ITK

Il nuovo tracciatore, ITK, ha specifiche che gli permetteranno di lavorare con pile-up  $\mu \sim 200$ , e di resistere a flussi di radiazione di 10<sup>16</sup> neq. In questa sezione vediamo questo e diversi altri miglioramenti che saranno apportati con la sostituzione di ID con ITK.

## 2.2.1 Schema di ITK

La geometria dei layer di Silicio prevista per ITK è mostrata in Figura 2.5.

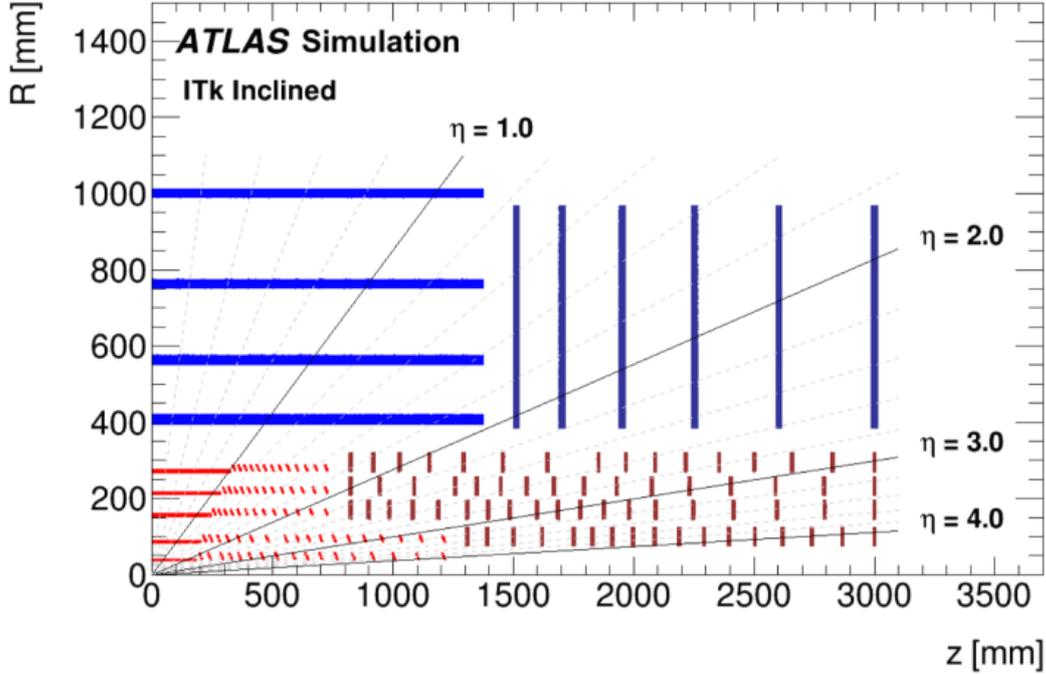


Figura 2.5: Disposizione spaziale degli strati di rivelatori a pixel (rossi) e rivelatori a strip (blu) che compongono ITK.

In Figura 2.5 si fa riferimento all'angolo del moto con il parametro pseudorapidità:

$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right) \quad (2.4)$$

dove l'angolo  $\theta$  è quello compreso tra l'asse del fascio e l'impulso della particella prodotta. Si tenga conto che ID ha una copertura in pseudorapidità nella regione  $|\eta| < 2.7$ , mentre da come si vede in figura il nuovo ITK garantirà copertura per  $|\eta| < 4$ .

I cinque strati più interni sono composti da rivelatori a pixel disposti secondo l'"Inclined Duals layout". In questo caso il rivelatore è composto da una parte centrale (barrel) con i rivelatori posti parallelamente al fascio. Nella zona più periferica, invece, è situato un endcap, dove i rivelatori sono posti perpendicolarmente al fascio. L'endcap è utile per la rivelazione di particelle con un angolo di moto piccolo rispetto all'orizzontale, cioè per la rivelazione di particelle ad alta pseudorapidità.

Nella zona periferica del barrel i rivelatori sono inclinati verso il centro di interazione così da ridurre l'angolo tra la superficie di rivelazione e il moto delle particelle incidenti, riducendo anche la quantità di materiale attraversata dalle tracce prodotte ad alta pseudorapidità (scongiurando problemi di deflessione di traiettoria e scattering multiplo). Dopo gli strati di rivelatori a pixel si hanno quattro strati di rivelatori a strip, disposti in un barrel centrale, accoppiati a sei strati di rivelazione nell'end-cap.

## 2.2.2 Prestazioni del tracciatore

Il sensore e le componenti elettroniche di lettura del segnale devono avere una buona robustezza alle radiazioni.

Nella zona più interna del rivelatore, come si vede in Figura 2.6, le componenti dovranno essere in grado di sostenere una radiazione di  $10^{16}$  *neq*.

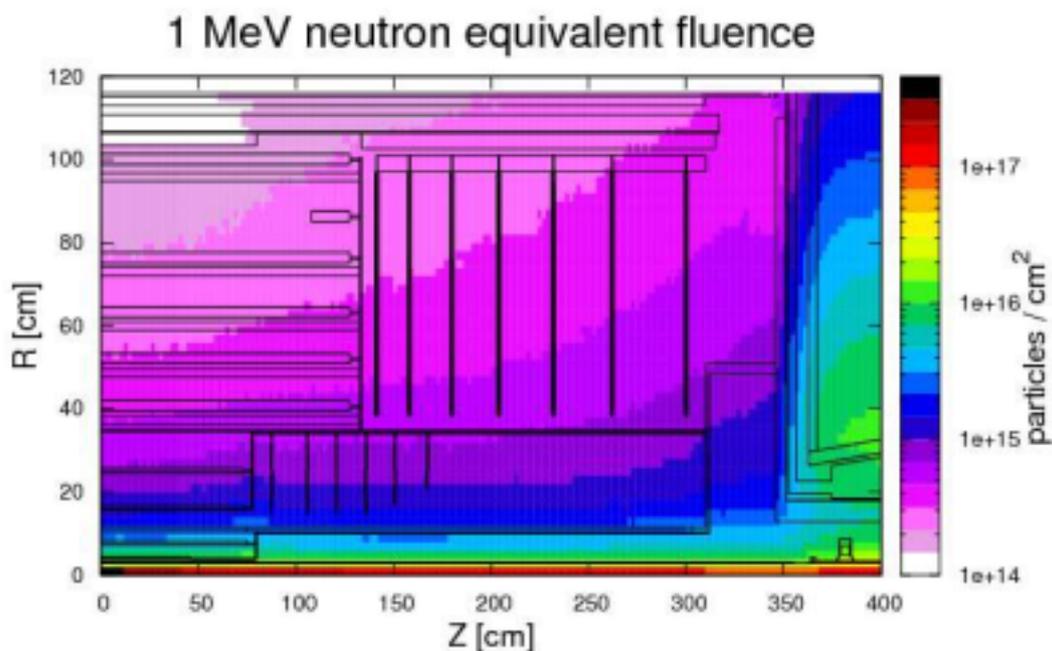


Figura 2.6: Simulazione di affluenza di particelle uscenti dal punto di interazione protone-protone tra i fasci di HL-LHC.

Il flusso di particelle a cui il rivelatore sarà sottoposto è tanto alto che le tecnologie attuali non consentono di costruire un detector in grado di sopravvivere, negli spazi più interni, per tutta la durata della presa dati. Per ovviare a questo problema i due strati

più interni di pixel detector saranno montati su un supporto estraibile in modo da poter essere sostituiti facilmente a metà della presa dati di HL LHC.

Un altro punto importante del miglioramento è la miniaturizzazione, infatti mentre ID possiede pixel di superficie che vanno da  $50 \times 400 \mu m^2$ , fino a  $50 \times 200 \mu m^2$  nel layer più interno in assoluto, i pixel di ITK hanno superficie  $50 \times 50 \mu m^2$  e  $25 \times 100 \mu m^2$ . Il passaggio a queste dimensioni permette di raggiungere una granularità tale da poter distinguere più di 1000 tracce per unità di pseudorapidità dallo stesso centro di interazione.

Il layout scelto limita anche la quantità di materiale complessivamente utilizzato. La lunghezza di radiazione, cioè il tragitto necessario a un elettrone per diminuire la sua energia di un fattore  $1/e$  in un materiale, è rappresentata in funzione della pseudorapidità in Figura 2.7.

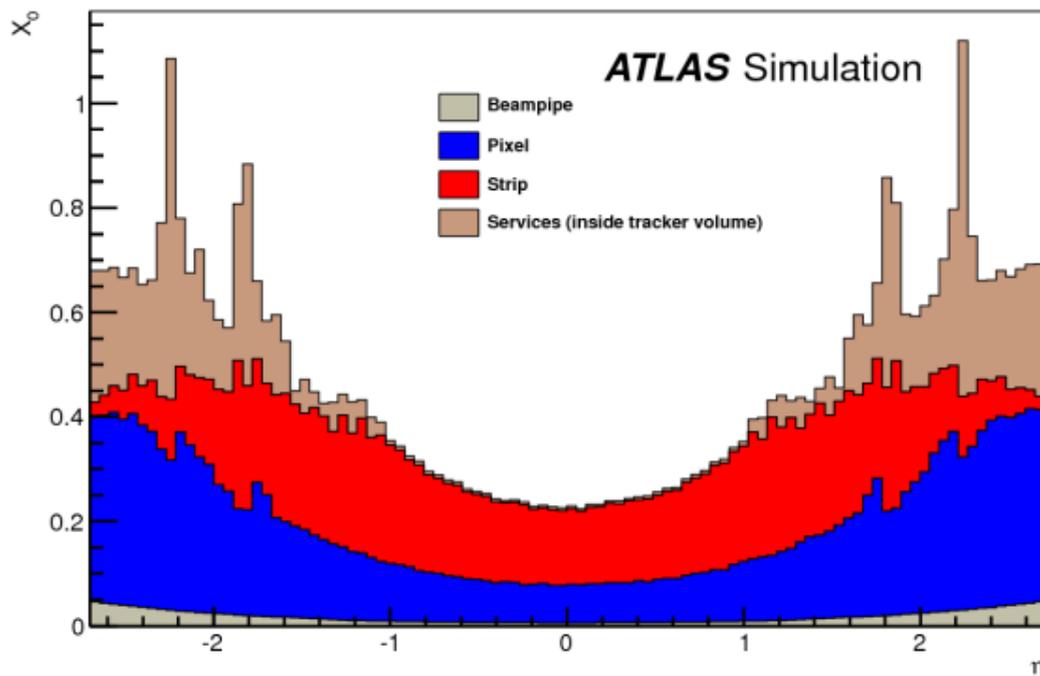


Figura 2.7: Lunghezza di radiazione dei componenti in Silicio di ITK in funzione della pseudorapidità della particella incidente.

I pixel detector saranno disposti su di un'area di  $8.2 m^2$  mentre gli strati di strip detectors saranno sistemati su  $19.2 m^2$ .

## 2.3 Componenti di ITK

Il progetto ITK prevede l'utilizzo di due diverse geometrie di realizzazione per i propri sensori a pixel: rivelatori 3D e rivelatori planari. In questa sezione si trattano le caratteristiche chiave di entrambi e quali sono i criteri che hanno portato alla scelta dell'utilizzo, di uno e dell'altro tipo di rivelatore, negli strati di cui si compone ITK.

### 2.3.1 Rivelatori a pixel in ITK

Come ho già ripreso negli scorsi paragrafi ITK è composto da rivelatori a pixel di dimensioni differenti:  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  e  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ . Inoltre sono impiegati due tipi diversi di rivelatore a pixel: i rivelatori 3D sono utilizzati nel primo strato di rivelazione, il quale si trova a soli  $34 \text{ mm}$  dal centro di interazione, mentre negli altri strati sono situati rivelatori a pixel planari.

I rivelatori 3D sono costituiti da un bulk di Silicio drogato p nel cui volume sono inseriti degli elettrodi drogati  $p^+$  e degli elettrodi drogati  $n^+$ , come si vede nella Figura 2.8.

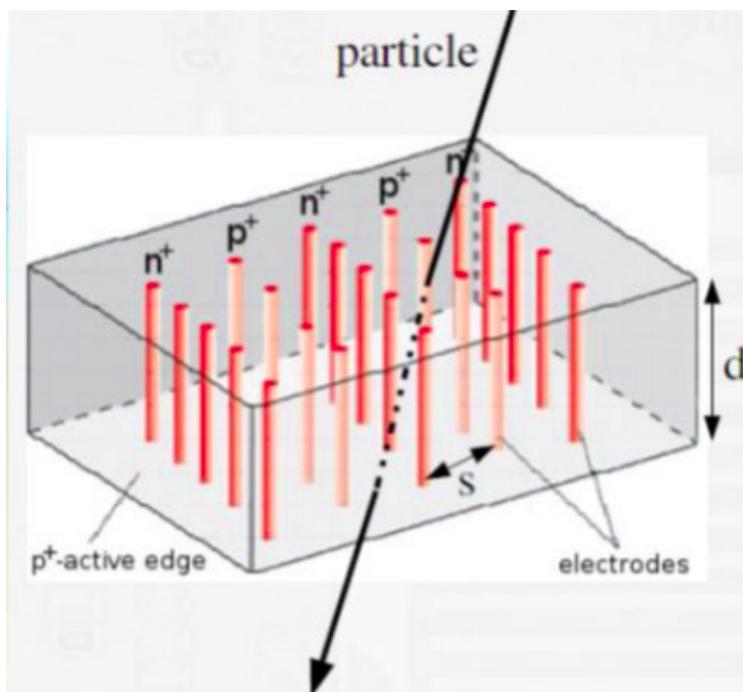


Figura 2.8: Rivelatore a pixel 3D attraversato da una particella.

La struttura geometrica del rivelatore 3D permette agli elettrodi di essere vicini tra loro ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ). La ionizzazione prodotta dalle tracce cariche ha un drift parallelo alla

superficie del modulo e deve percorrere uno tratto pari alla distanza tra gli elettrodi per essere raccolta. La distanza tra elettrodi, minore dello spessore del sensore, diminuisce la probabilità che le cariche libere vengano catturate da delle impurità e permette una raccolta più veloce della carica stessa, la quale ha sviluppo temporale più breve.

La zona di svuotamento nei rivelatori a pixel 3D è molto piccola, il che richiede di avere una tensione di polarizzazione inversa piccola e che si mantiene ridotta anche dopo i danni da radiazioni subiti dal bulk.

Il principale svantaggio nell'utilizzo dei rivelatori 3D è il costo piuttosto alto e la difficoltà nella produzione, rispetto ai sensori planari. Queste difficoltà si concretizzano, tra l'altro, in una grande quantità di rivelatori 3D che, dopo essere stati prodotti, non hanno le caratteristiche desiderate e risultano a tutti gli effetti difettosi.

I rivelatori 3D sono stati usati per la prima volta in ATLAS nella costruzione di IBL [9], che ha iniziato le operazioni nel 2015.

I rivelatori a pixel planari sono un tipo di rivelatori geometricamente più semplici di quelli 3D. In questo caso gli elettrodi sono sulla superficie di un substrato di Silicio, come si vede nella Figura 2.9. In sensori con questa geometria il drift delle cariche avviene lungo l'intero spessore del sensore (dell'ordine delle centinaia di  $\mu m$ ): non è possibile minimizzare la lunghezza del percorso delle cariche ionizzate dal passaggio di una particella.

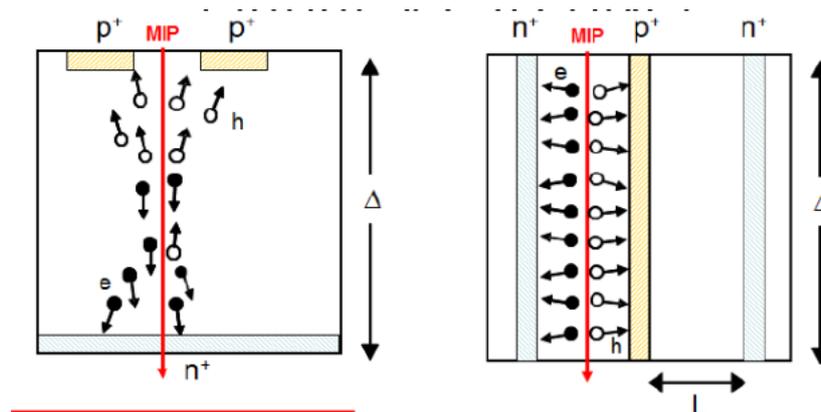


Figura 2.9: Confronto tra le caratteristiche geometriche di rivelatori planari (SX) e 3D (DX).

La tecnologia costruttiva garantisce buona efficienza, seppure la robustezza alle ra-

diazioni sia inferiore rispetto ai rivelatori 3D, per questo motivo sono situati nei layer più distanti dal centro di interazione.

## 2.3.2 Chip di Front-End

Ciascun gruppo di pixel è accoppiato con un chip di front-end che si occupa della raccolta, della preamplificazione e della digitalizzazione dei segnali generati all'interno della parte attiva dei sensori. I nuovi chip di front-end sono stati disegnati in modo da avere una geometria compatibile con i nuovi sensori.

I nuovi chip di front-end, rispetto a quelli presenti nell'attuale ID, utilizzano una tecnologia CMOS a  $65\text{ nm}$ , rispetto a quella a  $130\text{ nm}$  attualmente in uso. Questo consente una maggiore miniaturizzazione del sistema di preamplificazione, consentendo la lettura dei singoli pixel e quindi garantendo la granularità elevata del detector.

Proprio per questo progetto è stata avviata la collaborazione RD53, nata dall'unione dei ricercatori degli esperimenti ATLAS [10] e CMS, la quale ha sviluppato dei chip di front-end di circa  $2 \times 2\text{ cm}^2$ , ciascuno dei quali è in grado di monitorare  $1.5 \times 10^5$  pixel di  $50 \times 50\ \mu\text{m}^2$ .

Qualche informazione più dettagliata sul chip di front-end è presente nella Figura 2.10.

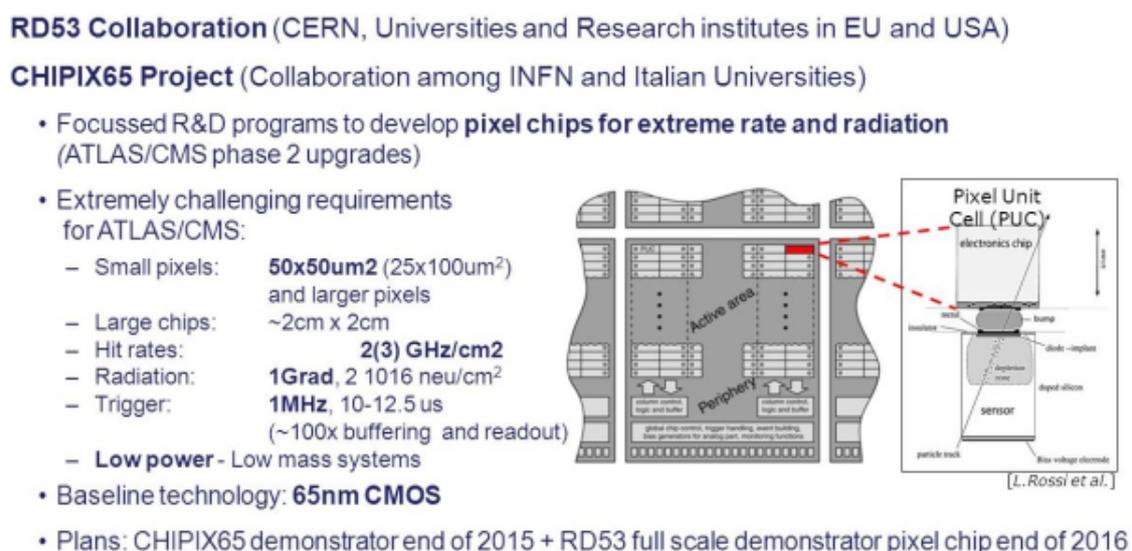


Figura 2.10: Dettagli sul chip RD53.

Il chip RD53 è sensibile a segnali inferiori a 1000 elettroni. Tale sensibilità permette di ridurre lo spessore del sensore di Silicio, quindi di ridurre il materiale attraversato dalle particelle.

## **2.4 Processo di produzione dei moduli di ITK**

### **2.4.1 Costruzione e assemblaggio**

La costruzione del rivelatore a pixel è composta da più fasi.

La parte attiva del rivelatore, cioè il wafer di Silicio, con tanto di elettrodi impiantati (per la definizione dei pixel) è realizzata in fonderie specializzate. Allo stesso modo la produzione del chip di front-end viene delegata all'industria.

L'ultimo processo che viene fatto in serie prima che i rivelatori passino nelle mani degli enti di ricerca è l'accoppiamento tra i wafer di Silicio (sensori) e i chip di readout, cioè il bump-bonding. Questo in particolare è un processo estremamente delicato che necessita un posizionamento estremamente preciso delle due superfici una sull'altra.

A questo punto del processo i laboratori di ricerca subentrano e si occupano delle procedure a partire dal "bare module": costituito da un sensore accoppiato a uno (o più) moduli di front end.

ITK prevede che, per i sensori 3D, vi sia un accoppiamento tra wafer e chip singolarmente, mentre i sensori planari saranno collegati a quattro chip ciascuno ("quad chip"). Un "bare module" non ha alcun connettore, per questa ragione si connette con un circuito stampato il modulo così che sia possibile alimentarlo, configurarlo e metterlo in comunicazione con i canali di lettura del chip di front-end. Il circuito stampato è incollato al modulo dal lato del sensore, la connessione elettrica tra il circuito e il chip di readout è fatta con dei sottili fili di alluminio (wire-bonds), come si vede nella Figura 2.11.

Completato il processo di assemblaggio il modulo è pronto ai test di qualifica.

ITK prevede che tutti i moduli siano testati individualmente, in modo da garantire il perfetto funzionamento di ciascuno di essi e selezionare quelli con caratteristiche migliori per l'assemblaggio. I risultati dei test di caratterizzazione servono anche per decidere la posizione che il modulo occuperà nel rivelatore: posizioni centrate rispetto al punto di

interazione del fascio saranno occupate dai moduli con le caratteristiche migliori, mentre quelli con caratteristiche peggiori occuperanno posizioni periferiche.

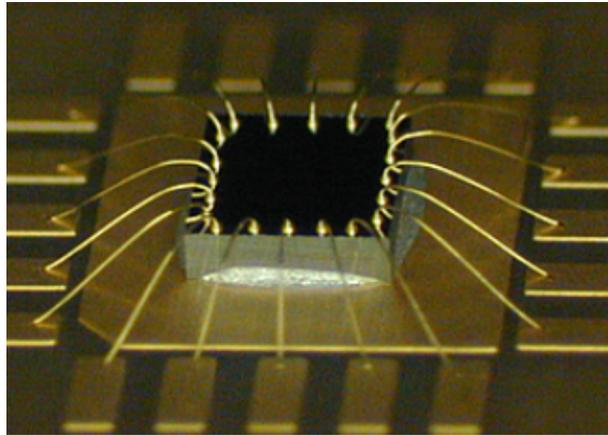


Figura 2.11: Collegamenti tra il chip di Front-End e il modulo a semiconduttore.

In particolare, durante i test, bisogna verificare che la delicata connessione tra parte attiva del rivelatore e chip di read-out sia corretta.

## 2.4.2 Caratterizzazione

Una volta assemblato ciascun modulo viene caratterizzato individualmente secondo un protocollo di test identico in tutti i laboratori che si occupano di questa fase del progetto. Il lavoro presentato in questa tesi è volto a garantire le operazioni di test in ambiente di temperatura e umidità controllate.

Il primo test che si effettua sui moduli è una ispezione ottica, per verificare che tutte le connessioni non siano danneggiate, e che non ci siano danni macroscopici sul sensore. Quindi si procede alla misura della caratteristica IV del sensore, in modo da verificare che la giunzione p-n presente nel sensore abbia le caratteristiche di corrente di leakage e di voltaggio di breakdown conformi alle specifiche di progetto.

Successivamente i moduli che hanno superato i test precedenti vengono sottoposto a dei cicli termici tra  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , per provare la robustezza dei collegamenti (bump-bonds) tra sensore e chip. Dopo di che si verifica, a diverse temperature, che il chip di readout sia funzionante. Poi si sottopone il modulo a una sorgente radiattiva, o a un tubo a raggi X, e si osserva che il funzionamento a temperatura di esercizio ( $\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sia corretto. Si valuta che tutti i pixel rispondano correttamente così da contare il numero di pixel, o

bump bondings, difettosi.

Il sistema di controllo di temperatura e umidità, di cui mi sono occupato, è fondamentale per gran parte dei test a cui sono sottoposti i moduli. Infatti durante le fasi di test bisogna essere certi che non avvengano fenomeni di condensazione sulle componenti del modulo (si monitora l'umidità relativa e la temperatura dell'ambiente circostante al modulo). Inoltre bisogna anche accertarsi che, durante i test, il calore prodotto dal chip di readout sia dissipato correttamente. Infatti, come visto nelle sezioni precedenti, la corrente di leakage ha una forte dipendenza dalla temperatura: una cattiva dissipazione termica porterebbe a un aumento del rumore che pregiudicherebbe tanto le operazioni del chip, quanto la validità del test di funzionalità del modulo.

I dati registrati dal sistema di monitoraggio vengono salvati su un database in modo da poter compiere anche analisi offline successivamente.

Il sistema di controllo della temperatura fa parte anche del Detector Control System (DCS): un sistema gestito da un microcontrollore che può interrompere i test, spegnere i moduli, o agire sui sistemi di controllo della temperatura nel caso le caratteristiche ambientali indichino delle condizioni che possano danneggiare i chip sotto osservazione.

# Capitolo 3

## Sistema di controllo delle condizioni ambientali

Questo capitolo descrive il mio contributo alle attività di test dei moduli di ITK.

Vengono descritti i dispositivi utilizzati e il software configurato per la costruzione e la messa a punto di un sistema di controllo delle caratteristiche ambientali e la loro registrazione su un database.

Il sistema è stato implementato su due architetture diverse: inizialmente il sistema è stato sviluppato, fino ad essere completamente funzionante sul mio pc di casa; lo stesso sistema sta venendo implementato e utilizzato all'interno dei laboratori di Bologna che si occupano della caratterizzazione dei moduli.

### 3.1 Sistema di lettura

Il primo obiettivo è stato quello di implementare un sistema di lettura dei sensori che saranno utilizzati durante i test di caratterizzazione.

Il sistema deve leggere tutti i sensori che saranno utilizzati, cioè tutti i sensori di temperatura e umidità posti in punti diversi dell'ambiente attorno al rivelatore e deve leggere tutti i sensori di temperatura direttamente a contatto con i moduli. L'ambiente è monitorato, in punti diversi, da dei sensori SHT85 [11], oltre che da qualche sensore un po' più economico. I sensori a contatto con i moduli stessi sono delle termoresistenze, e il sistema deve essere in grado di leggerne diversi contemporaneamente così da permettere

il test simultaneo di più moduli.

Il sistema deve ridurre al più possibile il numero di collegamenti, sia nella parte di lettura che in quella di trasmissione dei dati, la quale è affrontata nelle prossime sezioni.

Esistono due tipi di sensori di temperatura e umidità: analogici e digitali. In particolare le termoresistenze montate sui moduli necessitano una lettura analogica mentre per la misura dei parametri ambientali si possono usare dei sensori inclusivi di chip che forniscono direttamente il dato di interesse su un bus standard.

Un modo semplice per leggere i sensori, sia analogici che digitali, è utilizzare un microcontrollore Arduino [12]. Il microcontrollore (MCU) che è stato usato per implementare il sistema è un ESP32, un MCU commerciale dotato di modulo di comunicazione Bluetooth e Wi-Fi integrato. La scelta di questo MCU, sugli altri, è legata più al processo di distribuzione dei dati.

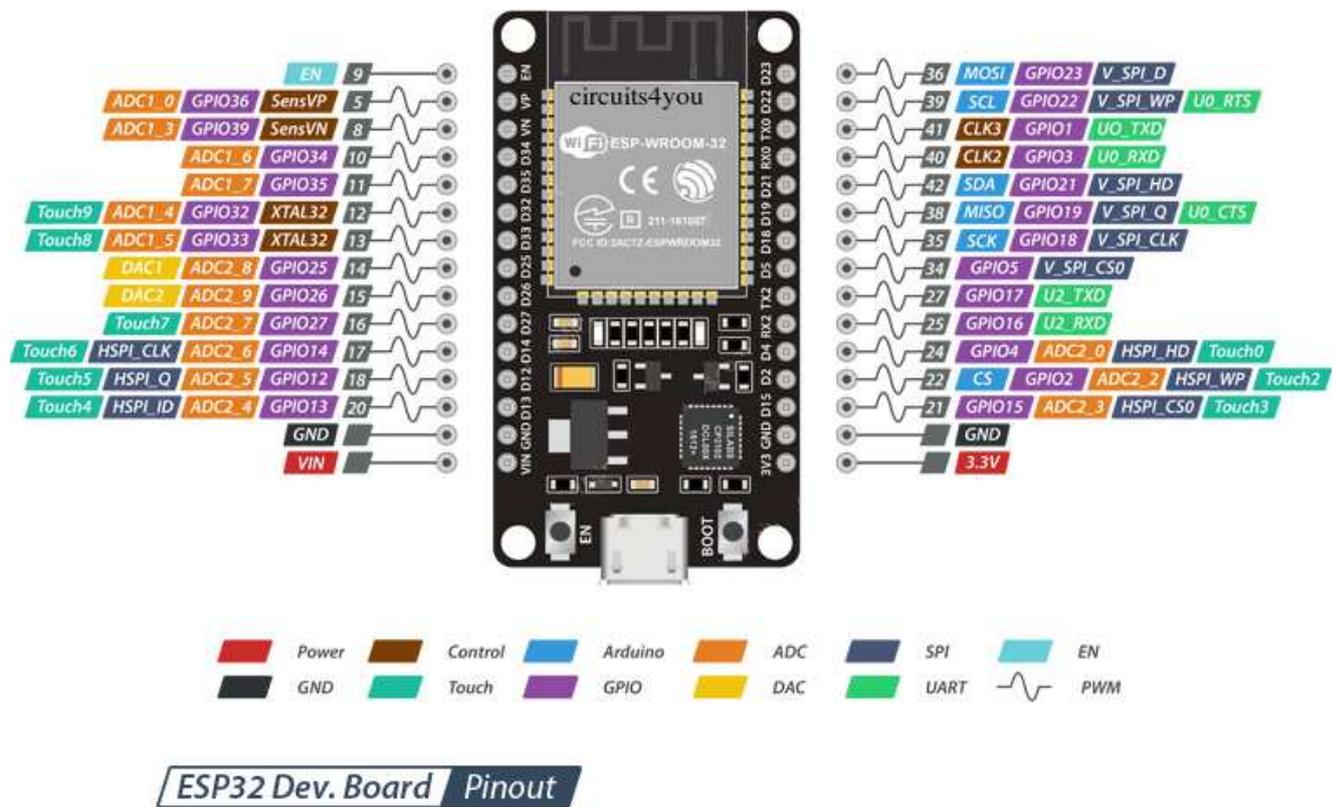


Figura 3.1: Pinout della scheda di sviluppo dell'ESP32

In commercio è disponibile l'ESP32 direttamente montato su di una scheda di sviluppo che in 38 pin mette a disposizione numerose periferiche, come si vede in Figura 3.1.

L'ESP32 si predispone per essere programmato con il linguaggio Arduino IDE oppure con Python. Durante l'implementazione del sistema sono utilizzati più o meno equivalentemente entrambi i linguaggi.

### 3.1.1 SHT85 e I2C

L'SHT85 [11] è un sensore di umidità e temperatura ad alta precisione. Come mostrato in Figura 3.2 si tratta di un circuito integrato con connettore pin-type con cui si può comunicare attraverso il protocollo I2C.

Pin	Name	Comments
1	SCL	Serial clock; input only
2	VDD	Supply voltage; input
3	VSS	Ground
4	SDA	Serial data; input / output

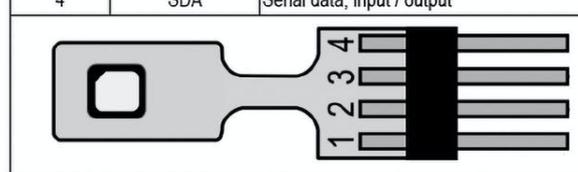


Table 6: SHT85 pin assignment (transparent top view). The die pad is internally connected to VSS.

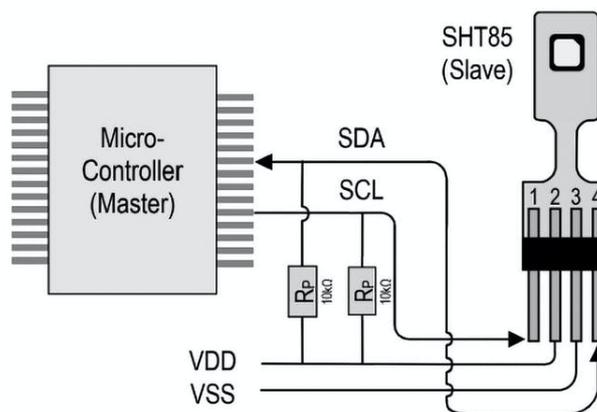


Figura 3.2: Pinout e schema di connessione del SHT85.

Il sensore SHT85 ha:

- un range di misura di umidità relativa da 0% a 100% con accuratezza di  $\pm 1.5\%$ ;

- accuratezza sulla misura di temperatura di  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , all'interno del range di temperatura compreso tra  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- alimentazione compresa tra  $2.15\text{ V}$  e  $5.5\text{ V}$ .

Il protocollo I2C è un sistema di comunicazione Master-Slave bifilare: per la comunicazione sono necessari due fili che connettono il Master (microcontrollore) a tutti gli Slave che comanderà (altri dispositivi, ad esempio i sensori). Il protocollo I2C permette di usare solo due linee di comunicazione per connettere tutti gli Slave al Master, diminuendo drasticamente la quantità di connessioni necessarie rispetto a una comunicazione peer-to-peer.

Le due linee di comunicazione sono:

- SDA (Serial Data) sulla quale il Master avvia processi di lettura e scrittura. A ciascuno Slave è assegnato un indirizzo diverso così che il Master possa riferirsi, in ogni momento, al solo Slave con il quale vuole interagire;
- SCL (Serial Clock) sul quale il Master scandisce il tempo per la lettura e scrittura (I2C è un sistema di comunicazione sincrono, cioè in tempo reale). Gli Slave sono sincronizzati al clock del Master.

Nell'ESP32 i pin di comunicazione I2C sono il 39 (SCL) e il 40 (SDA).

I sensori SHT85 hanno un indirizzo I2C standard, non modificabile, e identico per tutti i componenti. Questo rende impossibile connettere più sensori a uno stesso controller senza l'uso di un I2C multiplexer la cui implementazione è discussa nella prossima sezione.

I sensori SHT85, nel sistema, sono gli strumenti di misura della temperatura e umidità relativa nell'ambiente intorno ai moduli dei test.

Durante le fasi di sviluppo del sistema sono stati utilizzati anche sensori meno sensibili come ad esempio il DHT11 [13] e DHT22 [14].

### 3.1.2 Multiplexer TCA9548

Per poter collegare allo stesso microcontrollore più dispositivi I2C con lo stesso indirizzo (più SHT85) si può usare un I2C Multiplexer.

Un Multiplexer, in generale, è un dispositivo a N-ingressi e una sola uscita che dispone

di un metodo di selezione che permetta di scegliere, in ogni momento, l'ingresso che vogliamo replicare in uscita.

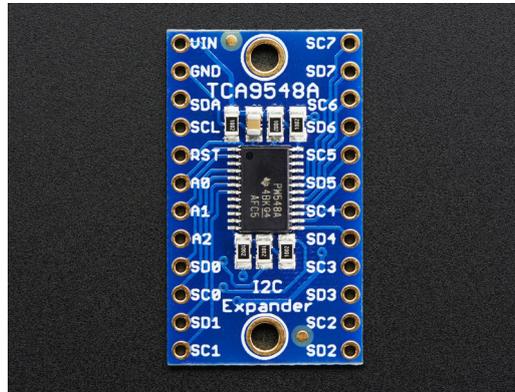


Figura 3.3: Pinout di un TCA9548A.

Il TCA9548 [15] è un Multiplexer I2C 8 in 1, cioè un Multiplexer che ha come canali di ingresso 8 coppie di canali SCL e SDA, e come canali di uscita una unica coppia di SCL e SDA. Come si vede nella Figura 3.3 il dispositivo possiede tre pin (A0 A1 A2), i quali sono utili a configurare l'indirizzo I2C del dispositivo. Questi tre pin infatti possono essere collegati a stati logici alti o bassi in 8 combinazioni diverse, permettendo al multiplexer di avere 8 indirizzi I2C possibili.

Tenendo conto che ciascun Multiplexer può gestire 8 SHT85, la cui selezione viene fatta attraverso il programma inserito nel MCU, e che ad un unico Master I2C possono essere collegati 8 TCA9548, usando tutti gli indirizzi disponibili, ciascun ESP32 è in grado di leggere fino a 64 SHT85.

L'alimentazione del modulo TCA9548 è compresa tra i 3 V e i 5 V.

In Figura 3.4 si vede come si possono collegare contemporaneamente due sensori a un Multiplexer, che poi viene comandato dall'ESP32, il quale si occupa di mettere tutte le letture in rete.

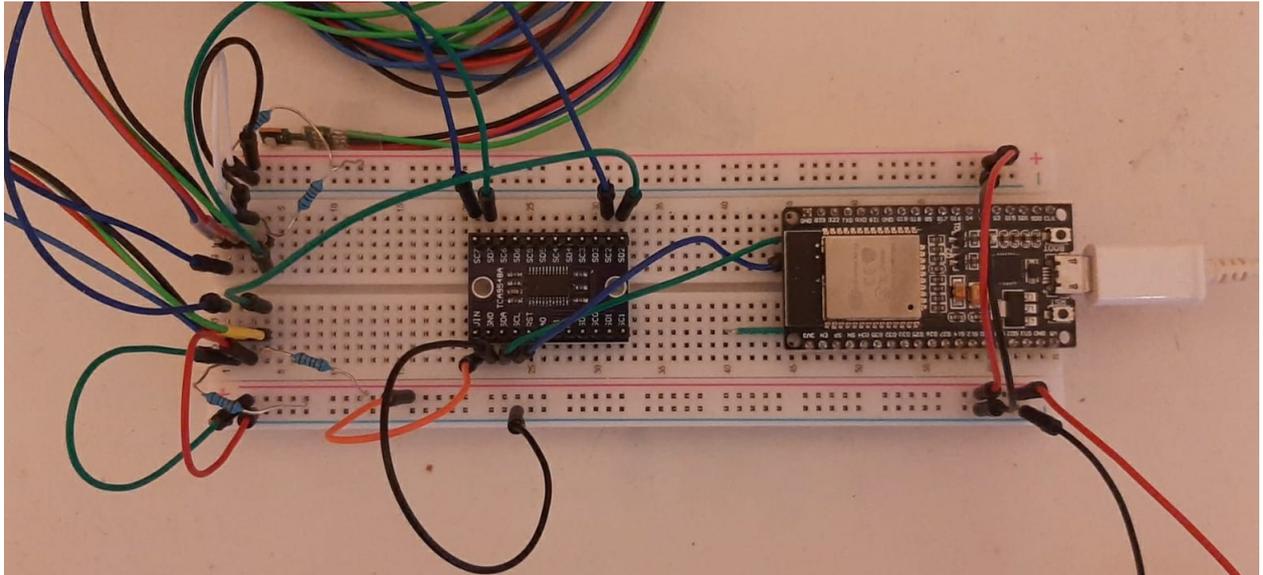


Figura 3.4: Connessioni Hardware tra il microcontrollore ESP32 e il modulo TCA9548. Si alimenta il Multiplexer con un'alimentazione esterna.

### 3.1.3 NTC

La temperatura registrata, in tempo reale, nella zona prossima al modulo sotto test non è necessariamente la stessa misurata sulla superficie del modulo.

Questo è dovuto all'inerzia termica del modulo stesso e a possibili condizioni di micro clima nei volumi in cui avviene il test. Ciascun modulo, tuttavia, è fornito di una termoresistenza (o termistore), posta a contatto con la superficie del modulo e che permette di misurarne la temperatura in tempo reale.

Un termistore è un resistore che, per costruzione, varia la sua resistenza in modo significativo al variare della temperatura.

In effetti qualsiasi resistore varia la sua resistenza in funzione della temperatura, questo effetto in generale viene limitato il più possibile al fine di avere resistori a resistenza costante. Invece quando si utilizzano termistori è proprio la variazione di resistenza in funzione della temperatura la proprietà interessante.

I termistori si dividono in due famiglie fondamentali: NTC (Negative Temperature Coefficient) [16], composta da termistori la cui resistenza diminuisce all'aumentare della tem-

peratura, e PTC (Positive Temperature Coefficient), i cui termistori si comportano in maniera opposta.

In generale la variazione della resistenza in funzione della temperatura ha comportamenti tutt'altro che lineari, come si può vedere qualitativamente nella Figura 3.5.

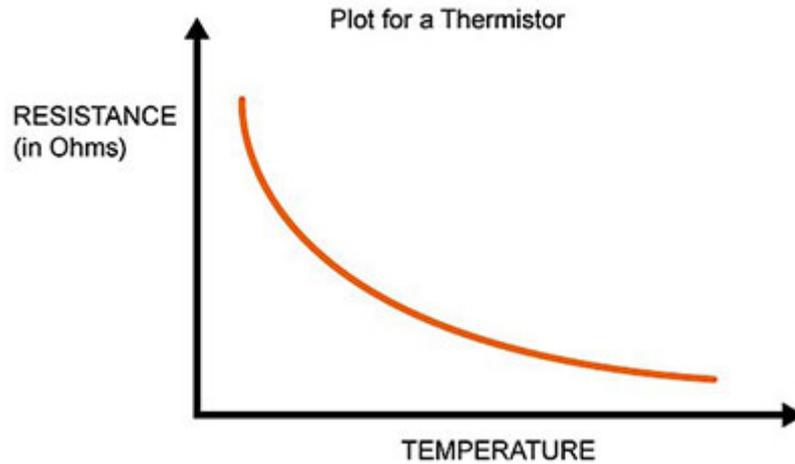


Figura 3.5: Rappresentazione qualitativa della resistenza in funzione della temperatura di un termistore NTC.

Uno dei metodi con cui possiamo trattare la relazione funzionale tra resistenza e temperatura  $R(T)$  è quello di utilizzare l'equazione di Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (3.1)$$

dove  $T$  è la temperatura misurata,  $T_0$  è la temperatura di calibrazione (generalmente 25 °C),  $R$  è la resistenza misurata alla temperatura  $T$ , mentre  $R_0$  è la resistenza alla temperatura di calibrazione. In ultimo  $\beta$  è la costante caratteristica che viene data dal costruttore.

Un altro metodo è quello di associare a ciascun range di valori di resistenza (piccolo quanto possibile) un valore di temperatura. Nelle schede tecniche fornite dal costruttore delle termoresistenze, sono presenti delle tabelle di valori  $R - T$  che permettono queste associazioni.

La misura di temperatura è ricondotta alla misura della caduta di potenziale sul termistore con circuiti di partizione di tensione, analoghi a quello mostrato in Figura 3.6. Misurata la tensione in uscita  $V_{out}$  ci si può ricondurre alla resistenza del termistore

secondo:

$$R_{thermistor} = R_{balance} \cdot \left( \frac{V_s}{V_{out}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

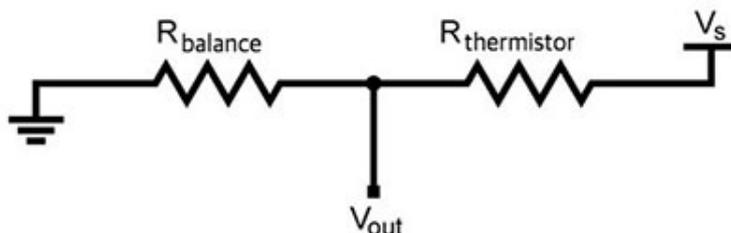


Figura 3.6: Schema di un partitore di tensione.

Durante i cicli termici per la caratterizzazione dei moduli si possono utilizzare termoresistenze anche per la misura della temperatura ambientale oltre che per quella dei moduli stessi.

In ogni caso la misura del voltaggio è una misura analogica, quindi per poter registrare i valori su disco è necessario ricorrere a un Analog-to-Digital Converter (ADC).

L'ESP32 ha degli ADC a 12bit integrati i quali sebbene funzionanti, non si sono rivelati ottimali per questo sistema. La risoluzione a 12bit, in questo sistema, corrisponde a una risoluzione in temperatura di  $\sim 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Inoltre questi ADC comunicano con i sensori tramite un sistema peer-to-peer, il quale necessita numerosi collegamenti. In ultimo, ma non per importanza, sperimentalmente si è visto che gli ingressi analogici dell'ESP32 sono soggetti a un rumore molto importante, che compromette completamente la qualità della lettura.

Per ovviare a queste limitazioni del sistema nativo dell'ESP32 è stato sviluppato un sistema di lettura che utilizza un ADC esterno con caratteristiche migliori.

### 3.1.4 Convertitore ADS1115

Per quanto riguarda il miglioramento della qualità nella conversione dei dati analogici, semplicemente, è sufficiente inserire all'interno della catena di lettura un ADC esterno, con le caratteristiche che vogliamo.

A questo proposito ho usato un modulo di conversione analogico-digitale ADS1115 [17],

il quale permette al microcontrollore di comandare un ADC.

Le principali caratteristiche del modulo ADS1115 sono:

- alimentazione di 2 – 5 V;
- risoluzione a 16 bit;
- 860 campionamenti al secondo;
- amplificatore a guadagno programmabile per un guadagno massimo di 16;
- ingressi configurabili come 4 canali single-ended, oppure 2 canali differenziali;
- dati in uscita distribuiti su un bus I2C;
- basso consumo durante la conversione ( $\sim 150 \mu A$ ).

Nella Figura 3.7 si vede come i quattro pin di ingresso (AIN0 AIN1 AIN2 AIN3), che nella mia implementazione per la lettura dei partitori delle NTC tratto come canali single-ended, cioè quattro ingressi analogici che vengono convertiti singolarmente, siano alternati da un Multiplexer (MUX).

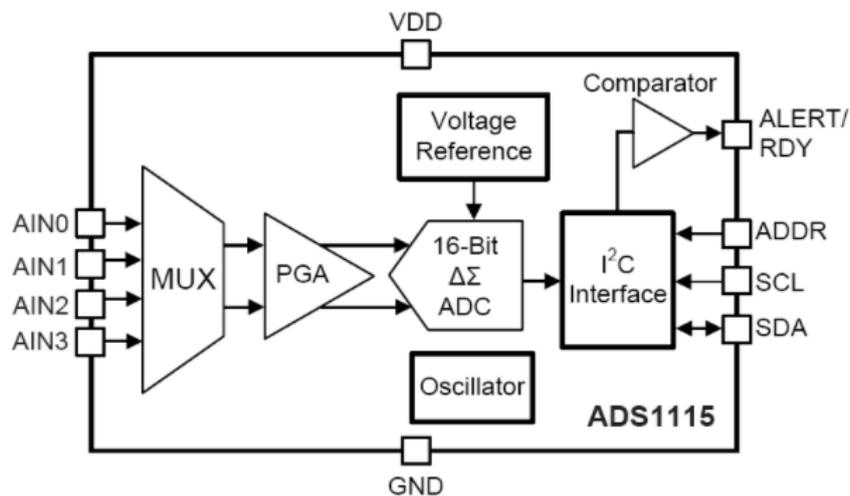


Figura 3.7: Schema interno del modulo di conversione ADS1115 con evidenza sulle connessioni tra i componenti integrati interni al modulo.

Gli ingressi vengono passati, uno alla volta, ad un amplificatore programmabile (PGA). Il dato in uscita dall'amplificatore, ancora analogico, viene convertito da un ADC a 16 bit e viene messo in uscita attraverso una interfaccia I2C. L'indirizzo I2C del modulo può assumere 4 valori distinti in base alle connessioni del pin di indirizzo (ADDR) come si vede in Figura 3.8.

È possibile comandare con lo stesso microcontrollore fino a 4 ADS1115, quindi leggere fino a 16 NTC contemporaneamente.

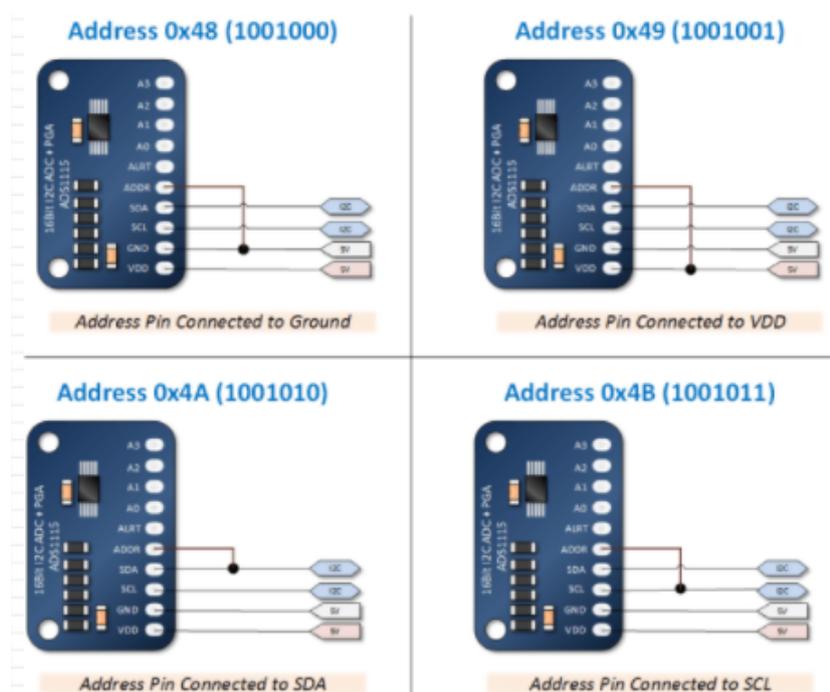


Figura 3.8: Connessioni per la configurazione di indirizzo I2C dell'ADS1115.

Un risultato interessante che abbiamo ottenuto, con l'implementazione dell'ADS1115 è stato quello di utilizzare solo il protocollo I2C per la trasmissione dei dati letti dai sensori, riducendo ulteriormente le connessioni necessarie al funzionamento di tutto il sistema, come si vede in Figura 3.9.

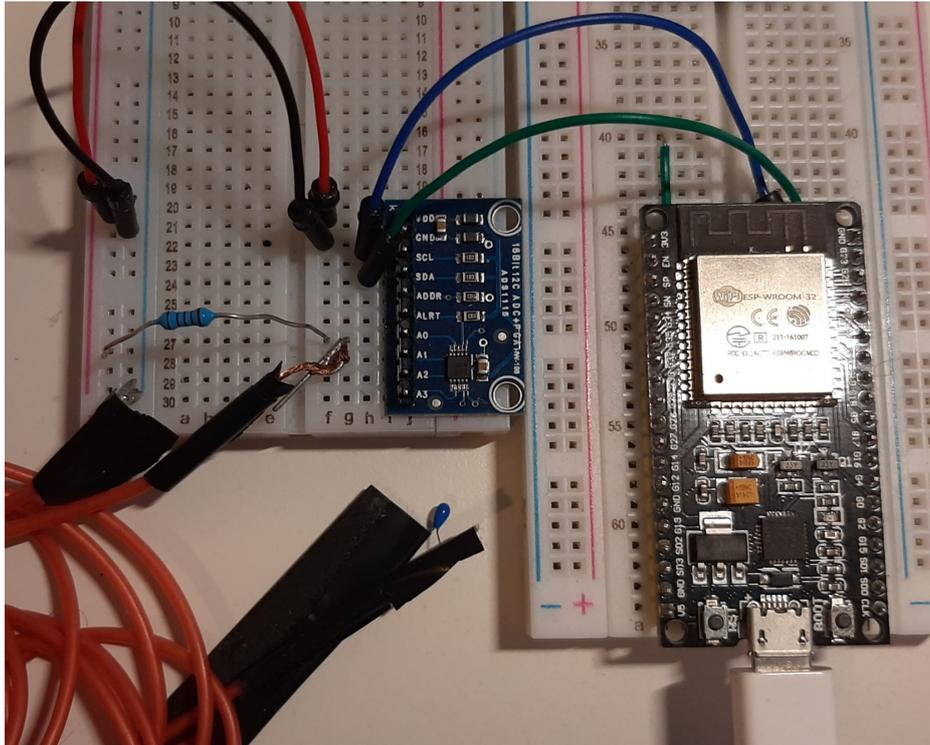


Figura 3.9: Circuito per l'utilizzo del modulo ADS1115 comandato da un microcontrollore ESP32.

## 3.2 Distribuzione Wi-Fi e immagazzinazione delle letture

Il sistema che è stato sviluppato sviluppato non deve solo fare misure precise di temperatura e umidità, ma deve poterle distribuire ad altri sistemi, in particolare deve inviarle ad un database e al DCS.

Per evitare un grande numero di connessioni fisiche si è reso necessario l'uso di un sistema di distribuzione dati wireless. ESP32 è stato scelto proprio perchè possiede un modulo di comunicazione Wi-Fi integrato.

In particolare il sistema utilizza un Broker Wi-Fi per trasmettere le misure su un Database Influx [18], dal quale è possibile, con il software Grafana [19], visualizzare le misure. La catena di distribuzione dei dati è mostrata in Figura 3.10.

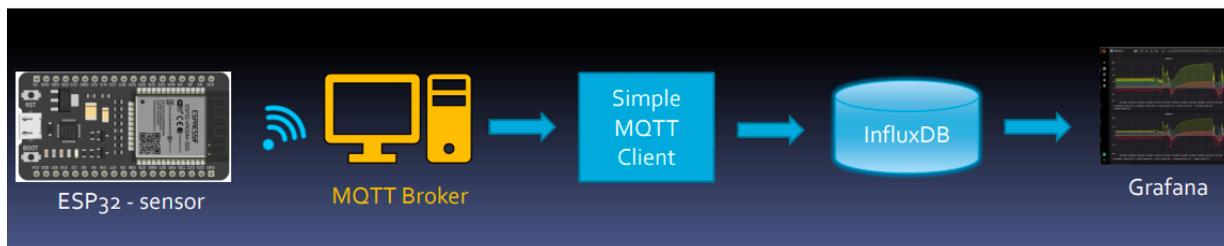


Figura 3.10: Distribuzione dei dati tramite Wi-Fi.

### 3.2.1 MQTT Broker

Un MQTT (Message Queue Telemetry Transport) Broker [20, 21] è un programma, in esecuzione su un dispositivo, che permette la distribuzione, e la ricezione, di messaggi sotto forma di stringhe agli utenti connessi alla stessa rete.

Un utente che voglia trasmettere può farlo attraverso l'indirizzo IP del dispositivo che sta attualmente mandando in esecuzione il broker. Il broker permette l'apertura di un Topic, cioè un argomento: una sezione entro la quale pubblicare il messaggio. Gli altri utenti possono iscriversi al Topic (al più conoscendo una password) e ricevere il messaggio.

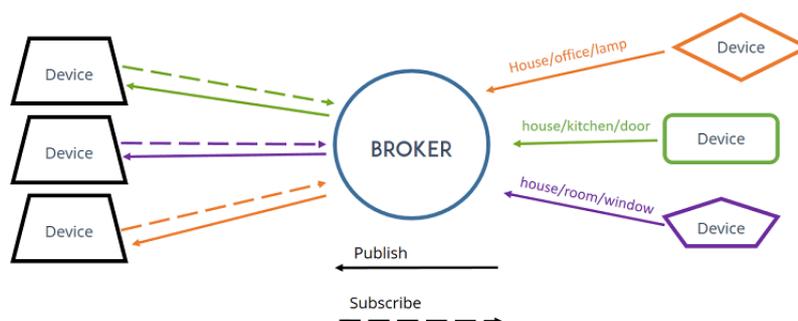


Figura 3.11: Schema della comunicazione con Broker MQTT.

Come si vede in Figura 3.11 MQTT è un protocollo di comunicazione bidirezionale che permette a ciascun utente di ricevere, quanto inviare, dati all'interno dello stesso Topic. In questa applicazione l'MQTT Broker è acceso nel computer e l'ESP32 vi si connette come Publisher (colui che scrive) e Subscriber (colui che riceve) contemporaneamente.

Il microcontrollore pubblica periodicamente i dati letti dai sensori ad esso collegato. Messi in circolo i dati da un Publisher, cioè dal microcontrollore che ha eseguito le letture dei sensori, è necessario configurare uno o più Subscribers che ricevano i dati.

### 3.2.2 InfluxDB

Il database che utilizziamo è un database Influx [18].

InfluxDB è un programma sviluppato in linguaggio Go [22] per l'immagazzinamento di serie temporali di dati.

L'elemento fondamentale all'interno di un InfluxDB è il Point, cioè il punto nel grafico della grandezza monitorata in funzione del tempo. Il Point contiene al suo interno numerose informazioni, tra cui:

- il tempo di arrivo del punto all'interno del database, con riferimento al fuso orario del luogo dove è eseguita la lettura del sensore;
- uno o più key-value, cioè il valore della misura. La possibilità di mettere più field in ciascun Point permette di monitorare, ad esempio, temperatura del modulo, temperatura dell'ambiente e umidità contemporaneamente e salvarle nello stesso Point, con tre field diversi (uno per grandezza);
- zero o più tags, cioè etichette, contenenti informazione secondarie, come ad esempio il nome dell'utente che ha inviato il dato o la rete attraverso la quale il dato è stato immagazzinato.

Un altro vantaggio di usare i database Influx è la enorme versatilità con la quale possono essere integrati in progetti diversi. Si può accedere, leggere e scrivere all'interno di InfluxDB con un'enorme quantità di metodi; al caso nostro fa l'interfaccia Telegraf [23] tra Influx e i broker MQTT.

Telegraf è un collettore di eventi, i quali sono immagazzinati sotto forma di serie temporali (nello stesso formato che utilizza InfluxDB). Configurare Telegraf permette di selezionare numerosi canali di input da cui esso riceverà i dati.

In questo sistema di trasmissione Telegraf ha una lista di Topics ai quali è iscritto come un regolare Subscriber. Telegraf riceve da ciascun Topic i risultati delle letture di un

microcontrollore diverso, oppure si può configurare che su ciascun Topic vengano trasmessi i dati di un singolo sensore, e che quindi ciascun microcontrollore abbia all'attivo un Topic per ciascun sensore che gestisce.

Dopo aver ricevuto i dati, in questo progetto, Telegraf li ridistribuisce ad un unico database Influx.

### 3.2.3 Grafana

Grafana [19] è l'ultimo anello della catena di distribuzione di dati via rete e si occupa della visualizzazione in tempo reale.

Installato Grafana su pc esso è accessibile tramite la porta 3000 (default) e permette la creazione di una Dashboard, cioè un pannello di monitoraggio in tempo reale di dati.



Figura 3.12: Grafico risultante dal monitoraggio di tre sensori, un DHT11, un SHT85 e una NTC in diverse condizioni ambientali (l'SHT85 e il DHT11 sono posti fuori e dentro il congelatore, mentre la NTC è in una camera con riscaldamento acceso).

I dati che vengono rappresentati nei grafici di Grafana non sono salvati in un database interno alla stessa applicazione, ma sono estratti da una sorgente esterna.

Una delle possibili Data Source è proprio InfluxDB. Grafana accede al, o ai, database che si vogliono visualizzare e ne rappresenta le misure; è possibile utilizzare tutti i tags e i fields di Influx per separare le misure all'interno dei grafici.

In Figura 3.12 vi è un esempio di grafico che ho fatto con Grafana durante i test per verificare che tutta la catena di lettura, distribuzione e rappresentazione delle caratteristiche ambientali funzionasse correttamente.

# Capitolo 4

## Conclusioni

Il sistema di monitoraggio di dati ambientali che ho sviluppato sta venendo implementato all'interno del laboratorio che si occupa della caratterizzazione dei rivelatori al Silicio di ITK.

Nelle precedenti sezioni si è visto come i moduli debbano essere sottoposti a dei cicli termici: questo è possibile ponendoli all'interno della camera climatica in Figura 4.1.

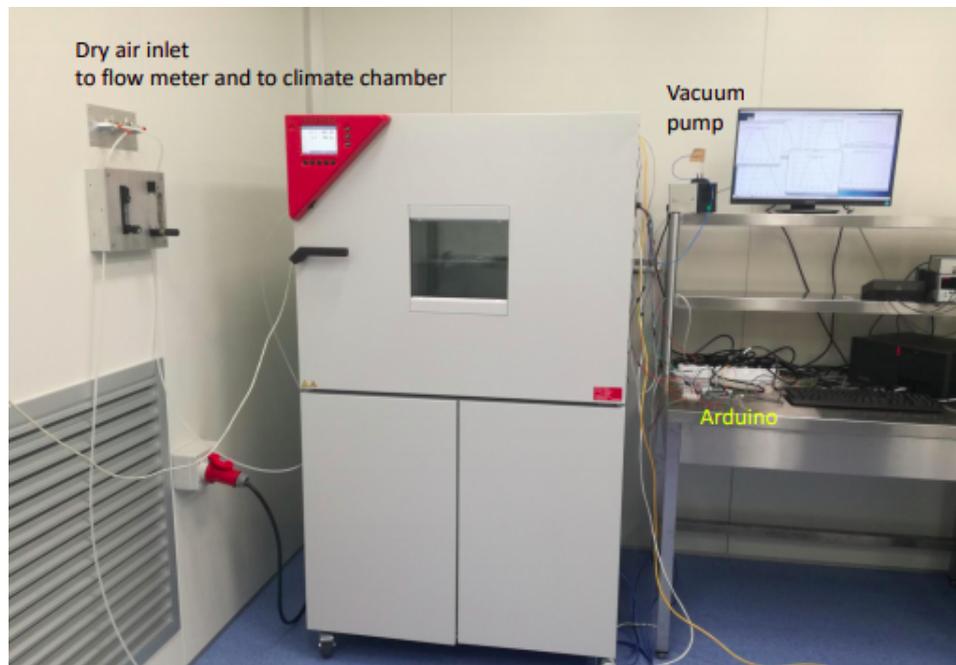


Figura 4.1: Setup predisposto ai cicli termici all'interno della camera pulita di Bologna.

Nella figura è visibile ed etichettato il canale dell'aria secca necessario a mantenere il punto di rugiada sotto le temperature che vengono attraversate durante i cicli. Nei grafici risultato dei monitoraggi durante le caratterizzazioni, infatti, è rappresentato anche il punto di rugiada corrispondente all'umidità relativa misurata dai sensori di umidità per assicurarsi che la temperatura non scenda mai sotto ad esso (e all'occorrenza far scattare il sistema di sicurezza). Nella Figura 4.2 è presente un grafico fatto con Python che monitora l'andamento della temperatura all'interno della camera climatica in un ciclo di test, senza moduli al suo interno.

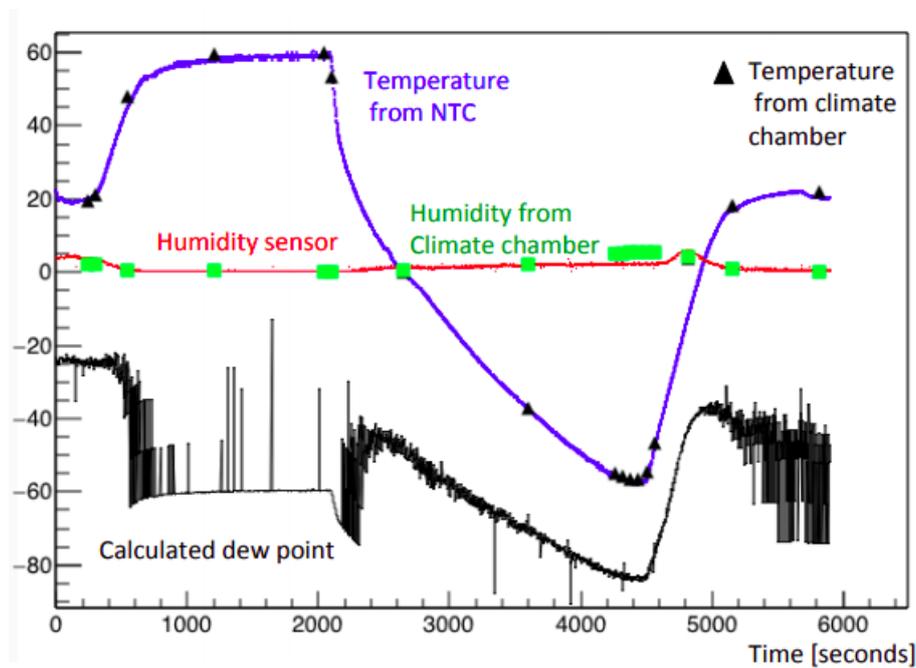


Figura 4.2: Monitoraggio di un ciclo di test con camera climatica vuota.

Durante le caratterizzazioni dei moduli di ITK che si stanno svolgendo all'interno dei laboratori di Bologna le letture che vengono fatte da microcontrollore vengono mandate in un database Influx, e poi sono disegnate con Grafana come si vede in Figura 4.3.

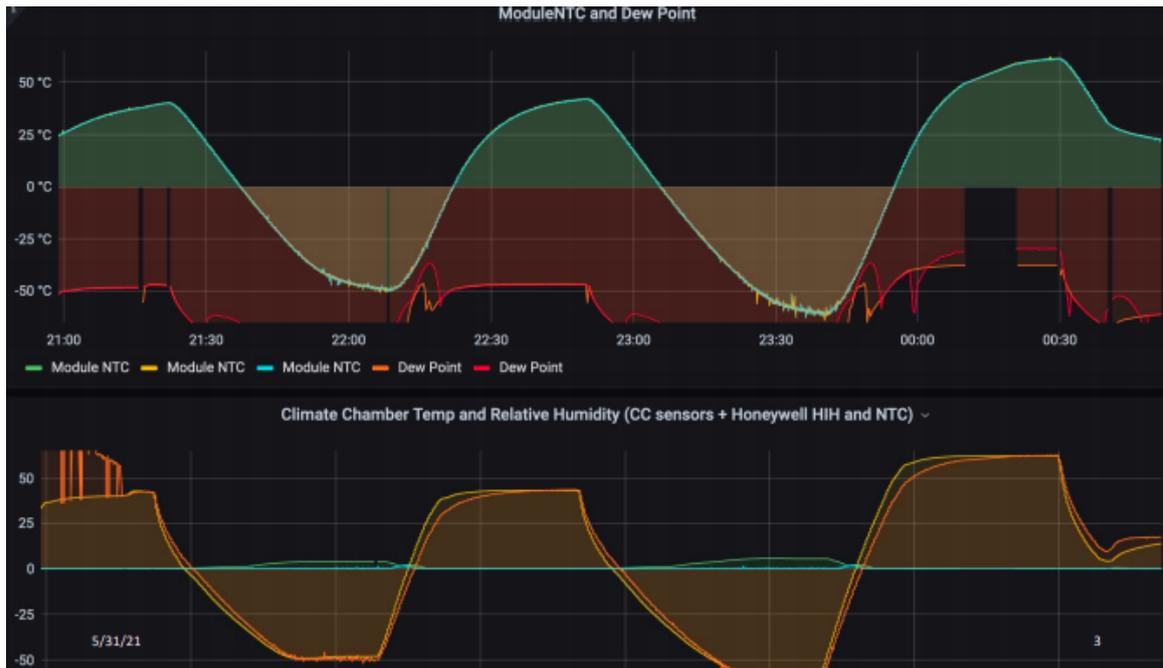


Figura 4.3: Disegno con Grafana delle letture dei sensori all'interno della camera climatica.

L'implementazione del sistema di distribuzione wi-fi dei dati all'interno della camera pulita non è ancora completa. Il grafico che ho riportato infatti è frutto di una catena di distribuzione leggermente diversa da quella che ho presentato nel capitolo precedente; essenzialmente i dati letti dal microcontrollore (attualmente è utilizzato un Arduino) vengono direttamente inseriti in Influx senza essere distribuiti dal Broker MQTT.

L'aggiunta del Broker MQTT è prevista per il prossimo futuro, non appena sarà disponibile una sottorete wi-fi interna alla camera pulita con le protezioni di sicurezza necessarie nel laboratorio. Questo tassello servirà a rendere ancora più automatico e scalabile il processo di caratterizzazione.

# Riferimenti

- [1] Sze. *Semiconductor Devices*. 2001.
- [2] J. Beringer. «Passage of particle through matter». In: (2014).
- [3] Rossi Fischer Rohe Wermes. *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*. 2005.
- [4] Einsweiler Pontecorvo. *Technical Design Report of the ATLAS Pixel Detector*. 2017.
- [5] G. Aad et al. «Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC». In: *Physics Letters B* 716.1 (set. 2012), pp. 1–29. ISSN: 0370-2693. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>.
- [6] URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCHWG>.
- [7] Brüning Oliver Sim. *LHC Design Report, v1 the LHC Main Ring*. 2017.
- [8] URL: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResultsRun2>.
- [9] Alessandro La Rosa. *The ATLAS Insertable B-Layer: from construction to operation*. 2016. arXiv: 1610.01994 [physics.ins-det].
- [10] URL: [http://www.scholarpedia.org/article/The\\_ATLAS\\_experiment](http://www.scholarpedia.org/article/The_ATLAS_experiment).
- [11] URL: [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Sensirion\\_10022018\\_HT\\_DS\\_SHT85\\_V0.9\\_D1.pdf](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/Sensirion_10022018_HT_DS_SHT85_V0.9_D1.pdf).
- [12] URL: <https://www.arduino.cc/>.
- [13] URL: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- [14] URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.

- [15] URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
- [16] URL: <https://www.vishay.com/docs/29053/ntcappnote.pdf>.
- [17] URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.
- [18] URL: <https://www.influxdata.com/>.
- [19] URL: <https://grafana.com/grafana/>.
- [20] URL: <https://mqtt.org/>.
- [21] URL: <https://mosquitto.org/>.
- [22] URL: <https://golang.org/>.
- [23] URL: <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>.