

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI SCIENZE  
Corso di Laurea in Fisica

Automatizzazione dei controlli di qualità  
per i sensori dei moduli dell'Inner Tracker  
dell'esperimento ATLAS per HL-LHC

Relatore:  
Chiar.mo Prof.  
Antonio Zoccoli

Presentata da:  
Bryan Da Ros

Correlatore:  
Dott.ssa  
Carla Sbarra

Sessione IV  
Anno Accademico 2017 / 2018



## **Abstract**

Dal 2026 avrà inizio la cosiddetta Fase II degli esperimenti di LHC, chiamata High Luminosity - LHC. Questa nuova fase prevede un miglioramento delle prestazioni di LHC in termini di luminosità, istantanea ed integrata, e un aumento importante nel pile-up, che arriverà a toccare le 200 interazioni protone-protone per collisione dei fasci. Di conseguenza saranno necessarie modifiche anche ai rivelatori che vi stanno attorno, per aumentarne sia la resistenza alla radiazione che la granularità, in particolar modo nelle parti più prossime al punto di interazione.

Il mio lavoro si colloca nella costruzione del nuovo Inner Tracker (ITk) di ATLAS, che dovrà soddisfare nuove richieste in termini di prestazioni.

Uno dei compiti della sezione di Bologna dell'INFN è quello di testare e qualificare i moduli ibridi a pixel di silicio che andranno inseriti in ITk. In quest'ambito il mio lavoro concorre all'automatizzazione del processo di qualifica di circa 2000 sensori che dovranno essere testati tre volte ciascuno: prima e dopo una fase di stress termico a temperatura ambiente, e infine alla temperatura di lavoro. La qualifica comprende test ai sensori, ai chip di readout e al loro collegamento. Per i sensori, la misura più significativa è quella delle caratteristiche I-V.

Il lavoro da me svolto, descritto nel capitolo conclusivo, è volto a concentrare in determinati momenti gli interventi manuali di chi andrà a effettuare i test, liberando tempo per altre attività, e a garantire un adeguato salvataggio dei dati, che dovranno essere caricati su un database per permettere la successiva selezione dei moduli da posizionare sul rivelatore.



# Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>L'Acceleratore LHC e l'esperimento ATLAS</b>                        | <b>5</b>  |
| 1.1      | Struttura e performance dell'acceleratore . . . . .                    | 5         |
| 1.2      | L'esperimento ATLAS . . . . .  | 10        |
| 1.3      | HL-LHC: High Luminosity LHC . . . . .                                  | 12        |
| <b>2</b> | <b>Tracciatori a pixel di silicio</b>                                  | <b>15</b> |
| 2.1      | Interazione della radiazione con la materia . . . . .                  | 15        |
| 2.2      | Proprietà del silicio . . . . .  | 16        |
| 2.3      | Giunzione P-N . . . . .  | 18        |
| 2.3.1    | Polarizzazione Inversa . . . . .                                       | 19        |
| 2.3.2    | Corrente Inversa . . . . .   | 20        |
| 2.4      | Rivelatori ibridi a pixel di silicio . . . . .                         | 21        |
| 2.4.1    | Architettura dei sensori ibridi . . . . .                              | 23        |
| 2.5      | Danno da radiazione . . . . .  | 25        |
| 2.6      | Rivelatori Monolitici . . . . .  | 27        |
| <b>3</b> | <b>Il Tracciatore Interno di ATLAS per HL-LHC</b>                      | <b>29</b> |
| 3.1      | Schema del tracciatore ITk . . . . .                                   | 29        |
| 3.2      | Moduli Ibridi del tracciatore a pixel . . . . .                        | 31        |
| 3.3      | Procedura di costruzione . . . . .                                     | 32        |
| 3.4      | Ruolo dell'Italia . . . . .  | 34        |
| <b>4</b> | <b>Automazione del processo di qualifica dei moduli a pixel di ITk</b> | <b>35</b> |
| 4.1      | Test di qualificazione da effettuare a Bologna . . . . .               | 35        |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.2 | Misura della caratteristica IV . . . . .                 | 37 |
| 4.3 | Dispositivo per la distribuzione di $V_{bias}$ . . . . . | 39 |
| 4.4 | Misura della temperatura . . . . .                       | 42 |
| 4.5 | Integrazione . . . . .                                   | 45 |

# Capitolo 1

## L'Acceleratore LHC e l'esperimento ATLAS

Il Large Hadron Collider (LHC) è il più grande acceleratore di particelle al mondo. E' una delle infrastrutture del laboratorio CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), che ha sede a Ginevra, e spazia, con i suoi 27 km di circonferenza, tra Svizzera e Francia. È situato nel tunnel che precedentemente ospitava il LEP (Large Electron-Positron Collider), a oltre 100 m di profondità nel sottosuolo, e opera facendo collidere due fasci di protoni o di ioni di piombo. L'obiettivo principale della ricerca di LHC è creare condizioni di densità di energia simili a quelle dei primi istanti dell'universo, anche se per un ridottissimo periodo di tempo e in una piccolissima regione di spazio, così da poter rigenerare le particelle che lo popolavano, concedendoci di accedere ai registri delle nostre origini.

### 1.1 Struttura e performance dell'acceleratore

I componenti più importanti dell'LHC sono gli oltre 1.600 magneti superconduttori in lega di niobio e titanio, 1232 di dipolo e 392 di quadrupolo, raffreddati alla temperatura di 1.9 K da elio liquido superfluido, che realizzano il campo magnetico di circa 8 T necessario a mantenere in orbita i protoni all'energia di progetto di 7 TeV per fascio. I due fasci di particelle circolano in direzioni opposte

in due tubi diversi che si raccordano nei punti di interazione e sono mantenuti in condizioni vicinissime al vuoto ( $10^{-10}$  torr).

Il fascio è strutturato in pacchetti (bunches) organizzati in treni. L'orbita di LHC è suddivisa in 3564 sezioni di 25 ns. In teoria ciascuna potrebbe ospitare un bunch di particelle. In realtà il massimo numero di pacchetti è 2808. Infatti per il funzionamento del processo di iniezione rimangono alcuni spazi vuoti tra diversi treni di bunches, e una zona vuota è necessaria a consentire l'estrazione dei fasci. Un pacchetto tipico contiene  $10^{11}$  protoni, ottenuti dalla ionizzazione di idrogeno gassoso, con fluttuazioni dell'ordine del 30% tra bunch e bunch.

I fasci collidono in quattro punti lungo l'orbita, in corrispondenza di caverne nelle quali il tunnel si allarga per lasciare spazio a grandi sale sperimentali. In queste stazioni sono collocati quattro esperimenti diversi: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (LHC-beauty) e ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Si tratta di enormi apparati costituiti da numerosi rivelatori che utilizzano tecnologie diverse e operano intorno al punto in cui i fasci collidono:

- **ATLAS:** è un rivelatore multi-purpose, atto a ricercare sia il Bosone di Higgs, sia altre particelle previste da modelli di nuova fisica, come la supersimmetria e la materia oscura.
- **CMS:** è simile ad ATLAS ma utilizza tecnologie differenti.
- **ALICE:** è principalmente dedicato allo studio di collisioni tra ioni pesanti.
- **LHCb:** studia prevalentemente il quark  $b$  e ricerca l'origine dell'asimmetria materia-antimateria.

Tra i parametri principali di ogni collisionatore si trova la luminosità istantanea  $\mathcal{L}$  definita come:

$$\mathcal{L} = F \frac{f N_a N_b}{4\pi\sigma} \quad (1.1)$$

dove  $N_{a,b}$  è il numero di particelle per pacchetto,  $f$  è la frequenza di collisione dei pacchetti,  $F$  è un fattore che tiene in conto dell'angolo tra i fasci e  $\sigma$  è la sezione trasversa del fascio.

Il numero  $n$  di eventi previsti per un processo di sezione d'urto  $\sigma$  in un intervallo temporale  $(T_1, T_2)$  è dato da:

$$n = L\sigma \quad (1.2)$$

dove  $L$  è la Luminosità Integrata nell'intervallo temporale, definita come:

$$L = \int_{T_1}^{T_2} \mathcal{L} dt \quad (1.3)$$

Più è alta la luminosità, più è alta la statistica di eventi prodotti. La luminosità si può aumentare in vari modi, almeno quando il fascio è costituito di "pacchetti" di particelle come a LHC: aumentando il n° di pacchetti, oppure aumentando il n° di protoni per pacchetto e/o diminuendo le dimensioni trasverse del pacchetto stesso.

In LHC, la luminosità istantanea di progetto è di  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mentre quella integrata su tutta la durata del progetto, che si concluderà nel 2023, eccede i  $450 \text{ fb}^{-1}$ . Quest'ultima ha effetto sulla resistenza alla radiazione che il rivelatore deve avere per non smettere di funzionare durante le fasi di RUN, o meglio per avere piena efficienza. Un altro parametro importante per il funzionamento dei rivelatori ospitati su LHC è il numero medio di interazioni  $\mu$  per ogni incrocio dei fasci (pile-up), che a LHC ha un valore di progetto di 25. Il pile-up ha effetto sull'occupanza del rivelatore, cioè il numero di particelle per unità di superficie, e ne determina la granularità.

LHC è in funzione dal 2010, e la sua operatività è stata suddivisa alternando fasi di funzionamento (RUN) e fasi di aggiornamento, ampliamento e potenziamento di tutta la struttura dell'acceleratore. Il RUN 1 (2010-2013) ha visto l'inizio delle collisioni con un'energia nel centro di massa di 7 e 8 TeV e una separazione tra bunches di 50 ns. Tale RUN sarebbe dovuto finire nel 2012, ma la scoperta del Bosone di Higgs nel luglio dello stesso anno ha convinto i ricercatori a prolungarlo fino all'inizio del 2013. I successivi due anni sono stati dedicati alla preparazione del RUN 2 (2015-2018). In particolare si sono migliorati i due circuiti di pre-accelerazione: il PS (Proto Synchrotron) e l'SPS (Super-Proto Synchrotron) che accelerano i protoni fino all'energia di iniezione di LHC, ossia 450 GeV. Il potenziamento effettuato è stato tale da poter raggiungere nella fase di RUN un'energia

nel centro di massa di 13 TeV e una separazione temporale tra bunches di 25 ns. Nel RUN 2 l'acceleratore ha funzionato meglio del previsto: in figura 1.1 e 1.2 sono mostrate la luminosità integrata in funzione del tempo e del pile-up medio; di fatto LHC è in grado di raggiungere un pile-up di circa 80-100, anche se con relativamente pochi bunches. Il problema è che i rivelatori non sono disegnati

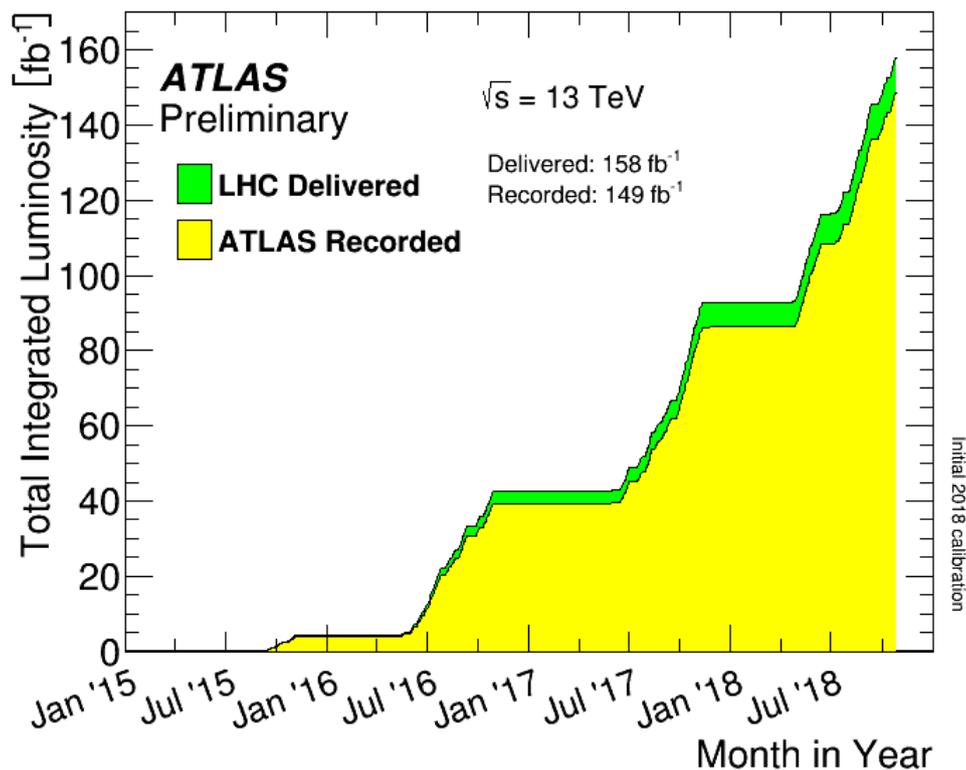


Figura 1.1: Luminosità integrata fornita all'esperimento ATLAS dall'acceleratore LHC nel RUN 2[1].

con granularità e banda di readout tale da poter sostenere un pile-up  $\mu \gtrsim 50$ . Quindi nella Fase I (fino al 2023) di LHC esiste un limite al massimo pile-up che può essere fornito da LHC senza pregiudicare le performance dei rivelatori che vi stanno intorno.

Alla fine del 2018 il RUN 2 è terminato ed è iniziata un'ulteriore fase di potenziamento dell'apparato. Si prevede il ritorno in funzione dell'acceleratore nel 2021 con il RUN 3, con energia di 14 TeV, per ultimare la cosiddetta Fase 1.

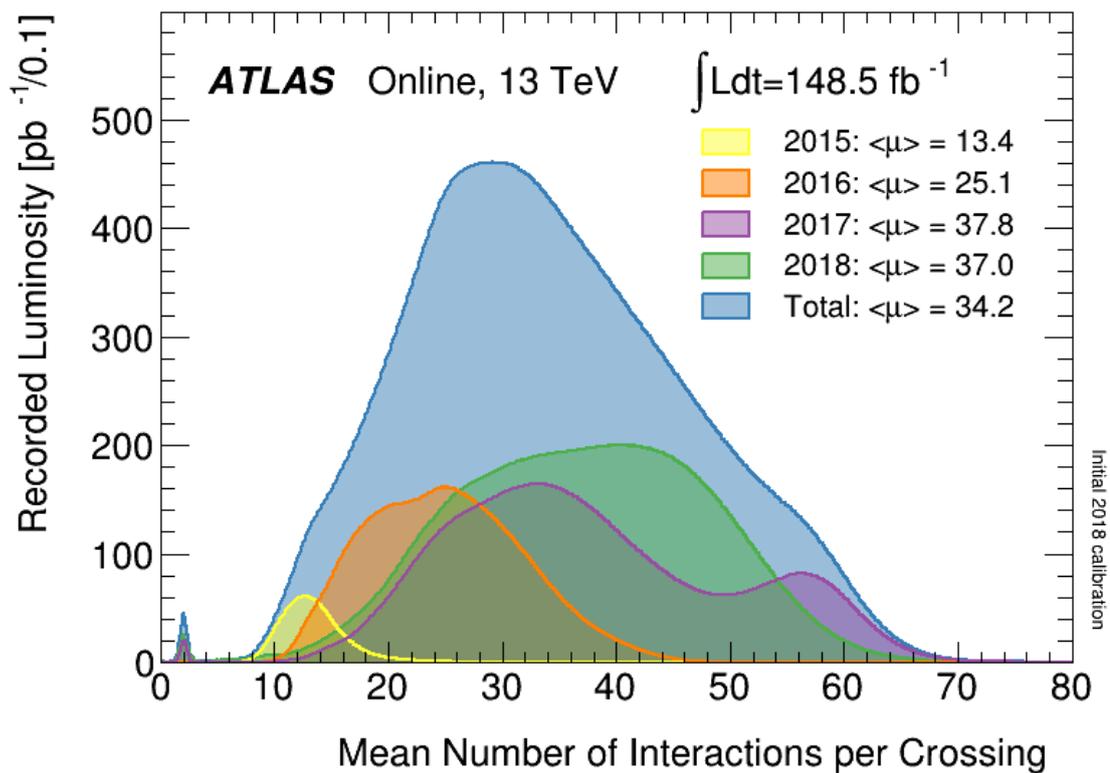


Figura 1.2: Luminosità integrata fornita da LHC all'esperimento ATLAS durante il RUN 2 (2015-2018) per collisioni pp avvenute a 13 TeV [1], in funzione del pile-up medio e dall'anno di funzionamento.

## 1.2 L'esperienza ATLAS

Un'immagine rappresentativa del rivelatore ATLAS è mostrata in figura 1.3. E' il rivelatore più grande tra i quattro che circondano il tubo a vuoto (beam pipe) dove avvengono le collisioni protone-protone ed è a forma cilindrica. L'apparato è lungo 44 m e alto circa 25m, con un peso totale di oltre 7000 tonnellate. È composto di una serie di sotto-rivelatori disposti a strati concentrici attorno alla beam-pipe: ognuno è composto da una regione cilindrica centrale (barrel) e due tappi laterali (end-cap) ed ha un ruolo specifico nella rivelazione delle particelle. In ordine, partendo dal centro, quindi dal punto più vicino al beam pipe, e procedendo verso l'esterno si trovano:

• **Rivelatore Interno o Inner Detector (ID):** il suo scopo è quello di ricostruire la traiettoria delle particelle cariche e da questa misurarne l'impulso trasverso. Il rivelatore centrale è infatti immerso in un campo magnetico solenoide di circa

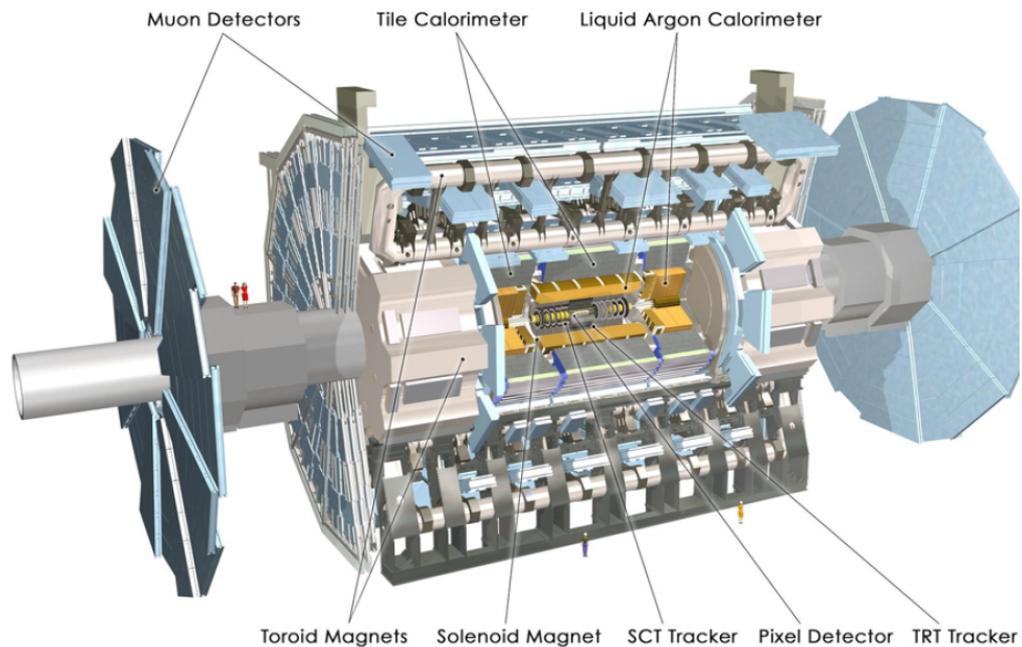


Figura 1.3: Schema della struttura dell'esperimento ATLAS

2T. Questo sottorivelatore è composto, dal centro verso l'esterno, di quattro piani di rivelatori a pixel (Pixel Detector), quattro strati di rivelatori a strip (SCT Tracker), che invece di segnare la traccia lasciata con la precisione di un pixel lo fanno con la precisione di una linea, e un rivelatore a radiazione di transizione (TRT Tracker), riempito di una miscela di gas di Xenon(70%),  $CO_2$  (27%) e  $O_2$  (3%), che aiuta l'identificazione degli elettroni rispetto alle altre particelle cariche.

- **Calorimetro Elettromagnetico (Liquid Argon Calorimeter):** misura l'energia di fotoni ed elettroni, che provocano sciami elettromagnetici assorbiti dallo strumento: si tratta di un rivelatore distruttivo. E' un calorimetro a campionamento con assorbitori di piombo e argon liquido (LAr) come materiale sensibile. Gli elettrodi immersi nel LAr sono disposti in una struttura a fisarmonica che minimizza gli spazi vuoti.

- **Calorimetro Adronico (Tile Calorimeter):** è il calorimetro preposto a rivelare ed assorbire le particelle che interagiscono fortemente: il barrel usa strati di ferro come materiale assorbitore e tegole (tiles) di scintillatore plastico come materiale sensibile mentre negli end-caps gli assorbitori sono di rame. C'è inoltre una sezione in avanti dove la radiazione è molto più elevata: essa fa uso di moduli di rame e tungsteno come assorbitori, e argon liquido come materiale sensibile.

- **Spettrometro a Muoni (Muon Detector):** è lo strato più esterno. Esso è l'unico ad essere raggiunto solo dai muoni, particelle che non vengono assorbite negli strati più interni. Le camere sono immerse in un campo magnetico toroidale, uno nel barrel e due negli end-caps. E' costituito da rivelatori a gas di quattro tipi diversi.

- **Rivelatori in avanti:**

- LUCID (Luminosity measurement Using Cherenkov Integrating Detector):** è il luminometro dedicato di ATLAS. LUCID è in grado di misurare la luminosità di ognuno dei bunch del fascio e in qualunque condizione di funzio-

namento di LHC. Usa fotomoltiplicatori con finestre di quarzo per campionare le interazioni anelastiche protone-protone.

-**BCM (Beam Condition Monitor)**: è costituito da otto sensori di diamante. Il suo scopo principale è di proteggere l'Inner Detector innescando l'eliminazione del fascio in caso di eccessive perdite del fascio stesso. La sua veloce elettronica permette di sfruttarlo anche come monitor di luminosità.

• **Sistema magnetico (Toroid Magnets e Solenoid Magnet)**: comprende bobine di materiale superconduttore per generare 2 T nel solenoide e 3-4 T nel toroide, responsabili della curvatura delle particelle cariche, essenziale per misurarne l'impulso trasverso.

• **Sistema di Acquisizione (TDAQ)**: il sistema di acquisizione comprende un sistema di trigger che screma sostanziosamente i dati registrati dall'elettronica di front-end passando da una frequenza di acquisizione iniziale di circa 40 MHz, corrispondente ad un volume di dati dell'ordine di  $4 \cdot 10^4 \frac{Gbyte}{sec}$ , a una frequenza di scrittura su disco di circa 500 Hz, corrispondente ad un volume di dati di circa  $10^2 \frac{Mbyte}{sec}$ . Il sistema di trigger è suddiviso in tre livelli:

- **LVL 1** è implementato in hardware e utilizza le informazioni dei calorimetri e dello spettrometro a muoni per ridurre la frequenza di acquisizione a  $\sim 75$  kHz con  $2.5 \mu s$  di latenza. Identifica inoltre le regioni di interesse (ROI - Region of Interest) del detector;
- **LVL 2** impiegando le ROI del livello 1, riduce il rateo di acquisizione a 3.5 kHz con latenza di 40 ms;
- l'**Event Filter** processa gli eventi con latenza di 4 s e li seleziona raggiungendo la frequenza finale di circa 500 Hz.

### 1.3 HL-LHC: High Luminosity LHC

High Luminosity LHC corrisponde alla cosiddetta "Fase II" di LHC che, a partire dal 2026, porterà a produrre fino a 200 interazioni per incrocio di fasci (pile-

up). È chiaro che i rivelatori che vi stanno attorno dovranno essere migliorati, e in particolare i sotto-rivelatori più vicini alla beam-pipe, dove la densità di particelle è più alta. Per esempio in figura 1.4 è mostrato l'effetto sul rivelatore centrale di ATLAS della differenza di luminosità tra quella iniziale di LHC (RUN 1) e quella prevista per HL-LHC.

Il goal principale di HL-LHC è incrementare la luminosità integrata da circa  $300 \text{ fb}^{-1}$  del RUN 3, a  $3000 \text{ fb}^{-1}$  nell'arco di 10 anni. Questo permetterà di aumentare il potenziale di scoperta di nuova fisica dell'acceleratore.

In figura 1.5 è mostrato uno schema delle fasi di funzionamento di LHC e HL-LHC, dal 2011 al 2038.

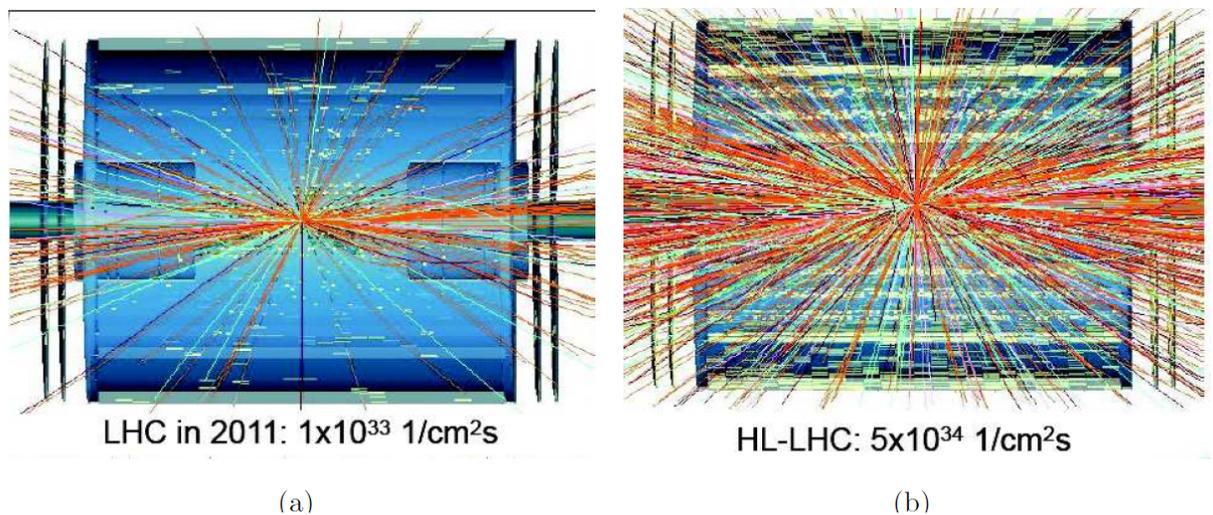


Figura 1.4: Simulazione delle tracce registrate nell'Inner Tracker nella fase iniziale di LHC (a) e HL-LHC (b).

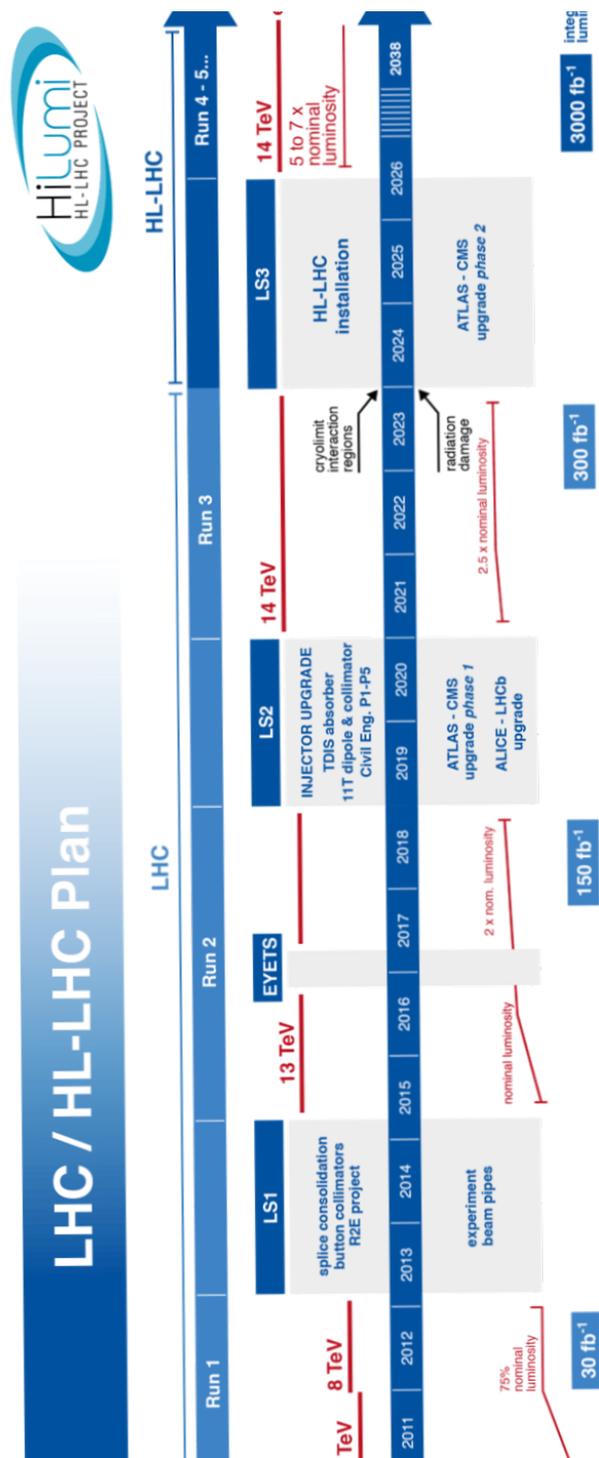


Figura 1.5: Andamento temporale di funzionamento di LHC: la Fase I termina dopo il RUN 3. Successivamente, con HL-LHC, ha inizio la Fase 2.

## Capitolo 2

# Tracciatori a pixel di silicio

I rivelatori a semiconduttore giocano un ruolo estremamente importante nella fisica delle particelle, così come in altre applicazioni di vario tipo. In questo capitolo se ne presentano le principali caratteristiche, partendo dall'interazione radiazione-materia e dal funzionamento di una giunzione p-n per arrivare alla descrizione delle diverse tecnologie impiegate nei moduli a pixel ibridi a pixel di silicio che rappresentano lo stato dell'arte dei tracciatori per acceleratori adronici.

### 2.1 Interazione della radiazione con la materia

Per creare un tracciatore efficiente è necessario avere chiaro come la radiazione interagisce con il materiale del rivelatore: le particelle cariche che attraversano la materia interagiscono con gli atomi di questa e perdono parte della loro energia attraverso processi di interazione elettromagnetica e nucleare. Gli effetti sono di due tipi: perdita di energia e deflessione della traiettoria rispetto alla direzione di partenza. Un tracciatore deve permettere di ricostruire le traiettorie delle particelle che lo attraversano con il minimo di perturbazione. Quando, in un'interazione, l'energia trasferita al materiale è sufficiente a ionizzare parte dei suoi atomi, gli elettroni liberati possono essere raccolti attraverso speciali elettrodi ed il segnale da essi generato processato per dare informazioni sul passaggio della particella ionizzante.

La perdita di energia per ionizzazione è descritta dalla formula di Bethe-Bloch:

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\Gamma)}{2} \right) \right] \quad (2.1)$$

dove:

- $\frac{dE}{dx}$  è l'energia persa della particella per unità di lunghezza di cammino,
- $N_A$  è il numero di Avogadro,
- $r_e$  è il raggio classico dell'elettrone,
- $m_e$  è la massa dell'elettrone,
- $z$  è la carica (in unità di carica elettronica) della radiazione,
- $Z$  è il numero atomico del mezzo assorbente (14 per silicio),
- $A$  è la massa atomica del materiale assorbente (28 per silicio),
- $\beta = v/c$ ,
- $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$  è il fattore di Lorentz,
- $I$  è il potenziale di ionizzazione medio (3.6 eV per il silicio),
- $\Gamma$  è la correzione di densità,
- $T_{max}$  l'energia cinetica massima che può essere trasmessa a un elettrone in una singola collisione.

Una MIP (Minimum Ionizing Particle) è una particella la cui energia dissipata corrisponde al minimo secondo la formula di Bethe-Bloch, il cui andamento per diversi tipi di particelle è rappresentato in figura 2.1.

## 2.2 Proprietà del silicio

Il silicio è un materiale semiconduttore caratterizzato da una banda proibita (gap) di  $E_g = 1.2$  eV. A temperatura ambiente la concentrazione intrinseca dei portatori di carica nella banda di conduzione è di  $n_i \sim 10^9$ .

Quando una particella carica passa attraverso il silicio crea, per ionizzazione, coppie di portatori di carica elettrone - lacuna ( $e^-$  - p) lungo il suo percorso in numero trascurabile rispetto alla concentrazione intrinseca. Infatti, poichè per una MIP si ha  $\langle \frac{dE}{dx} \rangle = 3.87$  MeV/cm e nel silicio  $I \simeq 3.6$  eV (tre volte l'energia del gap),

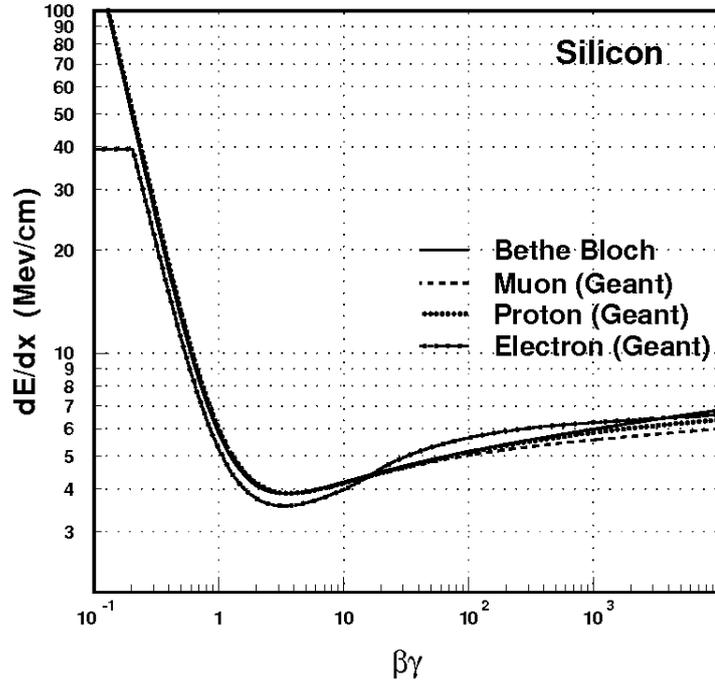


Figura 2.1: Andamento della Bethe-Bloch per il silicio per vari tipi di particelle [2].

il numero medio di coppie  $e^-$ -  $p$  prodotte lungo un cammino di lunghezza  $d = 100 \mu\text{m}$  corrisponde a:

$$N_{e/p} = \frac{dE/dx \cdot d}{I_0} \approx 10^4 \quad (2.2)$$

Confrontando questo valore con la concentrazione intrinseca, si vede che il segnale generato dal passaggio della MIP è di 5 ordini di grandezza inferiore: è chiaro che la carica rilasciata da una MIP non è, in queste condizioni, distinguibile dal rumore. Per strati di silicio sottili l'energia rilasciata non ha una distribuzione gaussiana simmetrica, ma piuttosto una distribuzione di Landau. Il valore più probabile (MPV) di coppie  $e^-$  -  $p$  è allora di 80 per  $\mu\text{m}$ .

A temperatura ambiente, la mobilità dei portatori di carica nel silicio è  $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  e  $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V s}$ . In presenza di un campo elettrico  $E$  la mobilità  $\mu$  determina il tempo di raccolta delle cariche libere. Per un cammino di lunghezza  $d$  si ha:  $t = \frac{d}{\mu E}$ .

## 2.3 Giunzione P-N

Una giunzione-pn consiste di due wafer di silicio connessi tra loro, uno drogato-p (aggiunta di atomi trivalenti) e uno drogato-n (aggiunta di atomi pentavalenti). Quando essi sono messi a contatto, parte dei portatori di carica maggioritari (elettroni nella zona n, lacune nella zona p) diffondono nella zona opposta. Questo processo innesca una ricombinazione tra questi ultimi e i maggioritari presenti nella zona opposta, fino a che non si raggiunge un equilibrio nella zona vicino alla giunzione, dove si ha un difetto di portatori di carica liberi e per questo motivo viene chiamata "depletion region" (regione di svuotamento): ai bordi della zona svuotata si instaura una differenza di potenziale  $V_{bi}$ , nota come *built-in voltage*, che contrasta una ulteriore diffusione delle cariche. Essa può essere espressa come

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad (2.3)$$

dove  $N_D$  e  $N_A$  sono le concentrazioni di drogaggio n e p rispettivamente,  $k_B$  è la costante di Boltzmann,  $T$  è la temperatura,  $e$  è la carica dell'elettrone e  $n_i$  è la concentrazione intrinseca di portatori del materiale semiconduttore. Nella zona svuotata è presente un campo elettrico  $E$  dato da:

$$E = \frac{V_{bi}}{d} \quad (2.4)$$

dove  $d$  è lo spessore della zona di svuotamento.

La giunzione-pn è spesso riferita come diodo avendo di fatto un effetto rettificante: se si polarizza la giunzione direttamente si ha passaggio di corrente, mentre in polarizzazione inversa non si ha che una corrente molto debole, come mostrato in figura 2.2.

La zona di svuotamento della giunzione-pn è quella più importante, *i.e.* sensibile, ai fini della rivelazione di particelle ionizzanti: nel caso ideale è priva di portatori di carica liberi, e ogni elettrone o lacuna creati o transitanti in questa zona verranno subito allontanati per effetto del campo elettrico qui agente. Se dei contatti elettrici (elettrodi) vengono posti ai margini di questa zona un segnale elettrico esattamente proporzionale alla ionizzazione verrà rivelato da questi. In pratica la giunzione-pn lavora esattamente come una camera a ionizzazione.

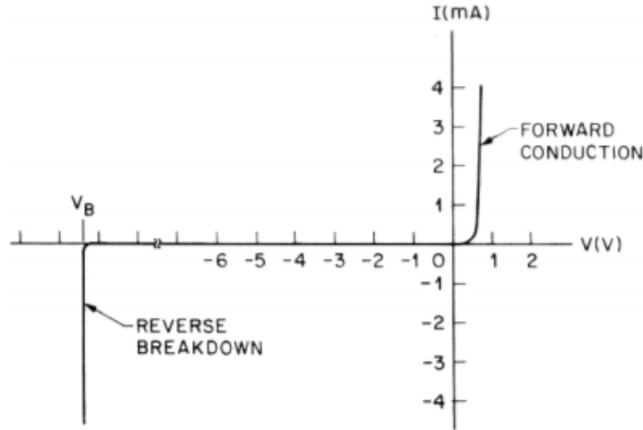


Figura 2.2: Caratteristica IV del diodo.

### 2.3.1 Polarizzazione Inversa

Polarizzare inversamente una giunzione-pn significa applicarle una differenza di potenziale  $V_B$  di segno inverso rispetto a  $V_{bi}$ : in questo modo, la zona svuotata si può allargare in tutto il dispositivo, rendendolo adatto alla rivelazione delle particelle. Lo spessore della depletion-region è dato dalla somma degli spessori svuotati delle due zone di semiconduttore drogati p e n,  $x_p$  e  $x_n$ :

$$d = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(-V_B + V_{bi})N_D}{eN_A(N_A + N_D)}} + \sqrt{\frac{2\epsilon(-V_B + V_{bi})N_A}{eN_D(N_A + N_D)}} \quad (2.5)$$

dove  $\epsilon$  è la permittività elettrica del materiale. Nel caso in cui una delle due zone sia molto più drogata dell'altra, la zona di svuotamento si trova interamente nel lato meno drogato e il suo spessore si può esprimere come

$$d \simeq \sqrt{2\epsilon\rho\mu_p(-V_B + V_{bi})} \quad (2.6)$$

dove  $\rho$  e  $\mu$  sono rispettivamente la resistività del materiale e la mobilità dei portatori di carica. La depletion region è dunque essenzialmente influenzata dalla resistività del materiale e dalla tensione di polarizzazione (bias) inversa. Aumentando  $V_B$  oltre un valore di soglia massima, detta "tensione di breakdown", il dispositivo diventa inutilizzabile e può danneggiarsi irreparabilmente. La tensione

di polarizzazione deve quindi soddisfare due richieste, che sono in contraddizione: il valore "ottimale" è quello per cui il wafer è completamente svuotato (full depletion voltage),  $V_D$ , e aumenta quadraticamente con il suo spessore  $d$ :

$$V_D = \frac{eN_D d^2}{2\epsilon} \quad (2.7)$$

$V_D$  deve però essere ben lontana dal valore di breakdown.

Una giunzione completamente svuotata si comporta di fatto come un condensatore a facce piane parallele e ha quindi una capacità di

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\rho}{2\epsilon A^2}}(-V_B + V_{bi})} \quad (2.8)$$

che influisce sul rumore complessivo del rivelatore.

### 2.3.2 Corrente Inversa

Un diodo ideale polarizzato inversamente non permette il passaggio di corrente. Un diodo reale invece, quando una  $V_B$  è applicata alla giunzione, presenta una piccola corrente, detta "corrente inversa di saturazione" (corrente di leakage). Essa è influenzata principalmente da due fattori che, in ordine di importanza, sono: (1) difetti o imperfezioni nella giunzione dovuti alla tecnica di montaggio, o nel materiale con cui sono fatti i semiconduttori e (2) la temperatura.

La temperatura influisce sulla concentrazione dei portatori di carica intrinseci secondo la relazione

$$n_i \propto T^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (2.9)$$

dove  $E_g$  è l'energia di gap del materiale. Anche la diffusione dei portatori dipende dalla temperatura secondo la relazione:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{e} \quad (2.10)$$

dove  $D$  è il coefficiente di diffusioni dei portatori, come pure la loro mobilità, in modo molto più complicato.

Alle tipiche temperature in cui operano i tracciatori a pixel di silicio, una variazione di 10°C corrisponde a una variazione della corrente  $I$  di un fattore tra 2 e 3.

La corrente di leakage è un parametro molto importante nel funzionamento dei rivelatori: essa ne limita la sensibilità, rappresentando una fonte di rumore, ed è estremamente sensibile a difetti e danneggiamenti del substrato.

## 2.4 Rivelatori ibridi a pixel di silicio

L'idea principale che sta dietro al funzionamento di ogni rivelatore è di raccogliere ogni quanto di carica generato dal passaggio di una particella ionizzante e processarlo in modo da farne un segnale riconoscibile e archiviabile.

Il più semplice rivelatore al silicio è una giunzione-pn polarizzata inversamente, la cui depletion-region rappresenta la "zona attiva" del sensore, complementata da un sistema per raccogliere le cariche come mostrato in figura 2.3. Per tale sistema

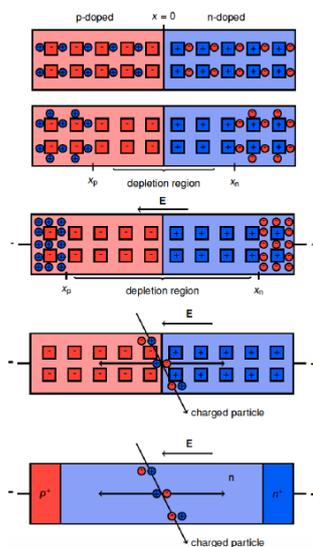


Figura 2.3: Schema di una giunzione-pn e la sua evoluzione in un rivelatore di radiazioni.

non è sufficiente depositare due strati metallici sui lati del semiconduttore dalle due parti della giunzione, poichè questi creerebbero di fatto un diodo rettificatore. Si utilizzano invece impianti con drogaggio molto elevato,  $p^+$  e  $n^+$  a cui collegare gli elettrodi metallici. Lo spessore della zona di svuotamento tra questi impianti e il metallo risulta estremamente piccola, tendenzialmente nullo, ed è

possibile realizzare un contatto ohmico con resistenza trascurabile rispetto a quella del semiconduttore nella zona di svuotamento.

Lo stato dell'arte dei tracciatori a pixel utilizzati presso i collisionatori adronici è costituito dai cosiddetti rivelatori ibridi. Uno schema di come sono realizzati è mostrato in figura 2.4. Come si vede, il rivelatore è composto da un sensore di

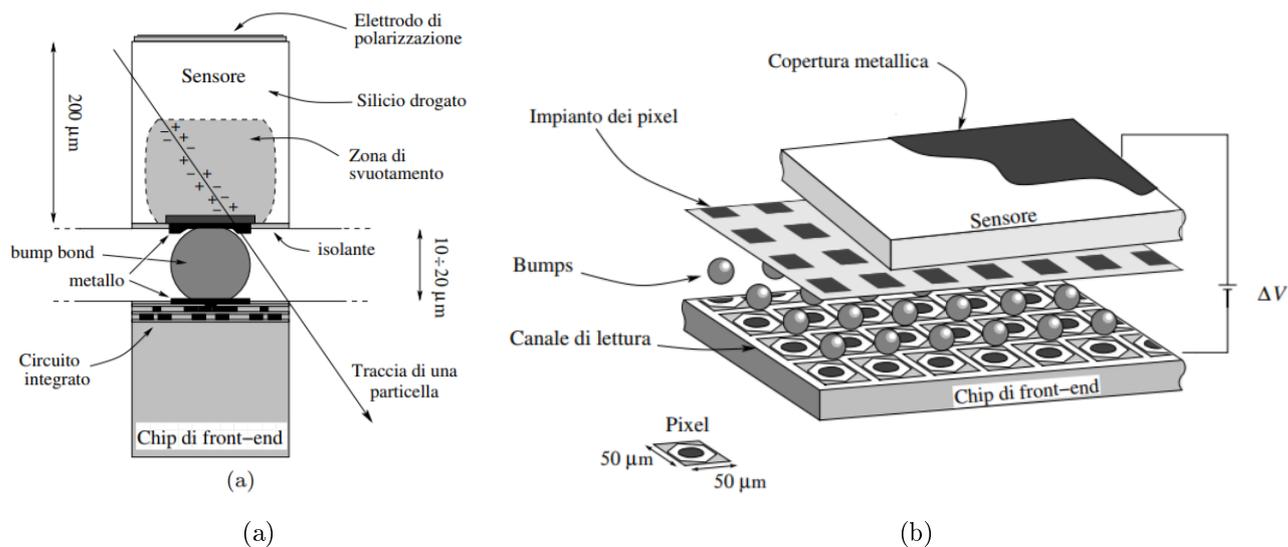


Figura 2.4: Struttura di una cella di un rivelatore ibrido al silicio (a) e schema del bump bonding tra rivelatore e front-end chip (b).

silicio di alta resistività e un chip per la raccolta ed elaborazione dei segnali, detto di front-end, tipicamente di bassa resistività e in tecnologia CMOS.

Sul sensore, (spesso  $100 \div 500\ \mu\text{m}$ ) moderatamente drogato (n o p), vengono impiantati tanti pixel con drogaggio estremamente elevato da un lato, e uno strato con alto drogaggio dall'altro. Le dimensioni del pixel definiscono la granularità con cui le informazioni sul passaggio della radiazione saranno acquisite.

Il chip è segmentato in pixels corrispondenti a quelli del sensore con cui deve essere accoppiato. Ogni pixel comprende almeno un pre-amplificatore, uno shaper e un comparatore.

Il sensore e il chip di readout sono collegati elettricamente da tante palline di materiale conduttore quanti sono i pixel (bump-bonding): si tratta di sfere

microscopiche di Indio, oppure in lega di Pb-Sn, dell'ordine della decina di micron, che vengono saldate tra il singolo pixel e il chip di readout.

### 2.4.1 Architettura dei sensori ibridi

Sono oggi utilizzati due principali tipi di sensori che si differenziano per la resistenza alla radiazione: i sensori planari e i sensori 3D:

- **Sensori Planari:** in questo caso i pixel e gli elettrodi sono impiantati sulla superficie del substrato di silicio e lo spessore del substrato coincide con il massimo percorso di deriva della ionizzazione che si vuole raccogliere. E' l'architettura più semplice. Esempi sono mostrati in figura 2.5. La prima generazione [2.5a] impiegava la tecnologia p-in-n, dove i pixel drogati  $p^+$  sono impiantati su un substrato n. I "guard-rings" servono a isolare i pixel, a tensione di terra, dalla tensione di polarizzazione. Questa tecnologia garantisce una buona efficienza in ambienti non critici rispetto ai danni indotti al sensore dalla radiazione. Come spiegato nel paragrafo 2.5, infatti, oltre una certa dose questo tipo di sensore cambia comportamento presentando un "type inversion", cioè si comporta come se fosse drogato n. La giunzione, inizialmente tra i pixel e il substrato, si trova allora sul lato della connessione per la  $V_{bias}$ . Se la tensione  $V_D$  di full depletion non può essere raggiunta, la zona svuotata non raggiunge i contatti con il chip di Front-End.

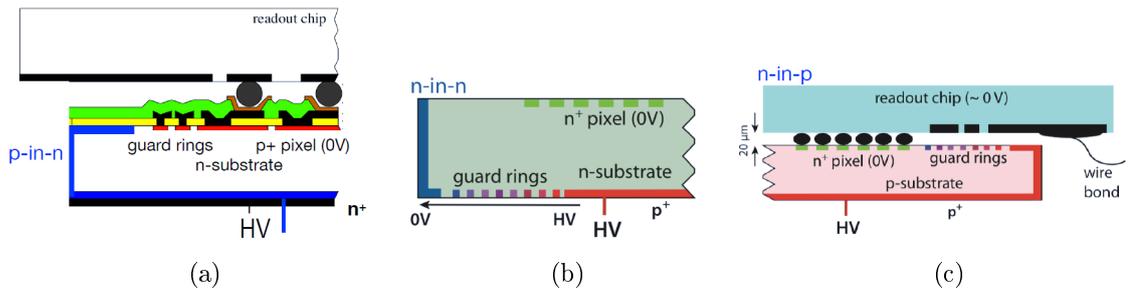


Figura 2.5: Evoluzione dei sensori planari: la prima generazione (a) p-in-n, quelli standard per LHC (b) e i nuovi per HL-LHC (c).

La seconda generazione [figura 2.5b], impiegata attualmente in LHC, impiega tecnologia n-in-n, dove i pixel  $n^+$  sono impiantati e messi a terra su un substrato-n.

Inizialmente la giunzione si trova tra elettrodo  $p^+$  e substrato, ma prima del type inversion  $V_D$  può essere ancora raggiunta così che il contatto tra la zona svuotata e la connessione con il chip di readout è ancora garantita. Dopo l'inversione la giunzione si trova tra substrato-p e pixel e, in caso  $V_D$  non possa essere raggiunta, si ha al più una diminuzione dell'ampiezza del segnale. Questa tecnologia è molto costosa poichè i guard rings stanno sul lato del contatto per la tensione di bias e quindi entrambe le facce del sensore devono essere lavorate con tecniche industriali.

La tecnologia impiegata per HL-LHC sarà di tipo n-in-p [figura 2.5c]: un solo lato del sensore è lavorato e lo spessore dei sensori non eccede i  $150 \mu\text{m}$ .

•**Sensori 3D:** in questa architettura gli impianti che definiscono i pixel sono realizzati all'interno del foglio di silicio anziché sulla sua superficie, come mostrato in figura 2.6. Il principale vantaggio della tecnologia 3D è che permette di disaccoppiare la distanza tra gli elettrodi dallo spessore del sensore. Con una distanza tra elettrodi minore, come si vede in figura 2.7, è infatti possibile operare con una depletion-voltage minore. Limitando lo spazio di deriva a parità di ionizzazione, si

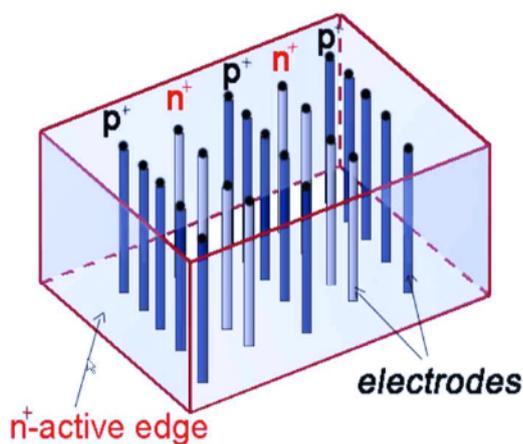


Figura 2.6: Schema del sensore 3D.

minimizza la probabilità di cattura delle cariche libere, ottenendo quindi maggiore resistenza alla radiazione e maggiore velocità di raccolta. I primi moduli 3D sono stati realizzati e utilizzati nello strato più interno del rivelatore a pixel dell'esperimento ATLAS. A sfavore dei sensori 3D si trovano una minore resa di produzione,

che può essere un fattore critico se si devono coprire grandi superfici, e maggiori costi di realizzazione rispetto ai planari. Solo poche fonderie sono attualmente in grado di realizzarne di buona fattura.

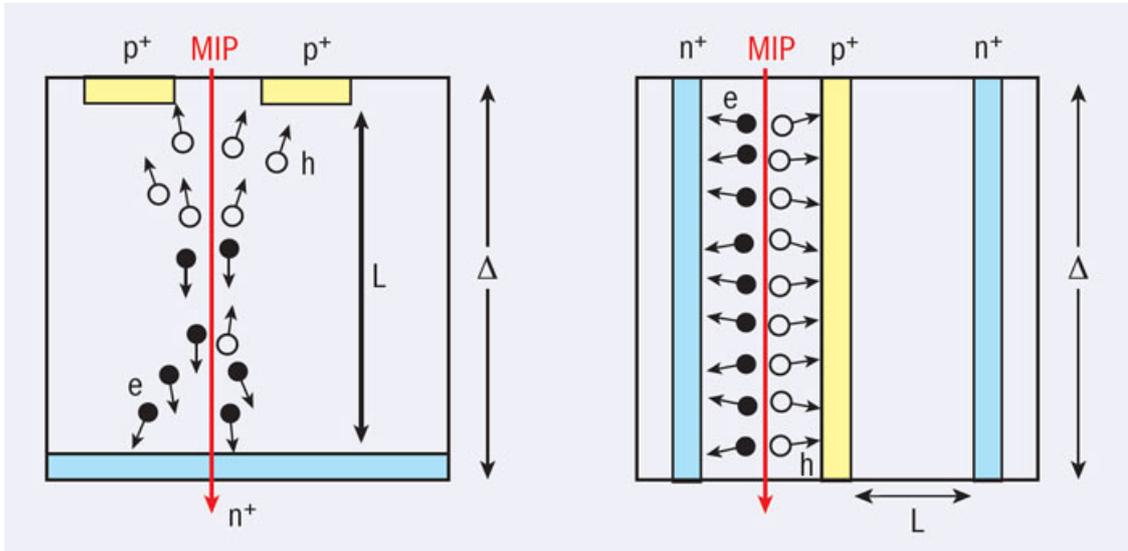


Figura 2.7: Funzionamento di sensori planari p-in-n (a sinistra) e 3D (a destra).

## 2.5 Danno da radiazione

I rivelatori sviluppati per operare in esperimenti di Fisica delle Alte Energie devono essere progettati e testati per operare correttamente ai livelli di radiazione cui saranno esposti durante il loro funzionamento. I danni dovuti alle collisioni con la radiazione ne riducono il tempo di vita e si suddividono in due categorie: danni superficiali e danni di massa (bulk damages):

- **danni di superficie:** causano un aumento della capacità del rivelatore e in generale correnti indotte che si sommano alla corrente di leakage.
- **bulk damages:** sono i danni causati nel substrato, dovuti alle interazioni adroniche tra la radiazione e il silicio, che ne modificano il reticolo cristallino: le collisioni possono per esempio spostare letteralmente un nucleo generando una vacanza, ossia un buco nel reticolo, che agisce come un "centro di intrappolamento" in cui le

particelle create per ionizzazione vengono bloccate prima di raggiungere l'elettrodo: l'effetto è mostrato in figura 2.8a. Ancora, il continuo spostamento in seguito a più collisioni può andare a spostare un nucleo in una posizione non reticolare andando a formare un interstizio. Più interstizi possono formare degli aggregati interstiziali, che compromettono la vita e il funzionamento del sensore. La probabilità di creazione degli aggregati dipende dal tipo di particella incidente e dalla sua energia. Oltre ad aumentare la probabilità di trapping come appena descritto, la radiazione in generale provoca anche un incremento della corrente di leakage, come mostrato in figura 2.8b, e della tensione di svuotamento  $V_D$ . L'incremento della corrente di leakage dipende linearmente dal flusso di radiazione incidente  $\phi$ :

$$\Delta I_{leak} \propto V_B \phi \quad (2.11)$$

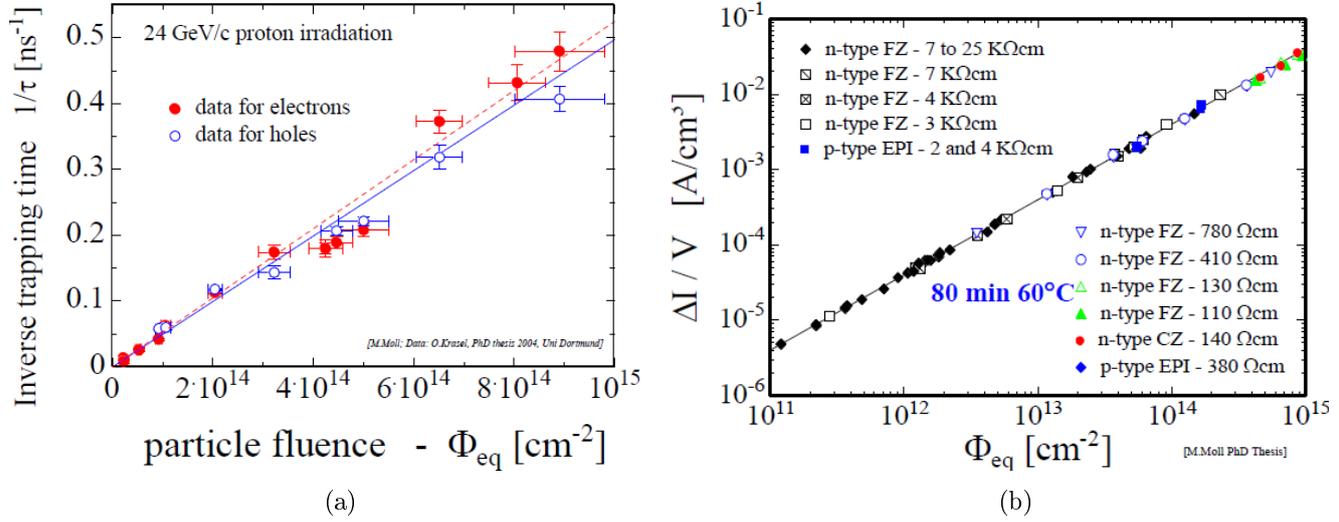


Figura 2.8: Variazione del reciproco del tempo di cattura delle cariche libere create (a) e della corrente di leakage (b) in funzione del flusso di radiazione incidente.

## 2.6 Rivelatori Monolitici

Un obiettivo molto importante per la Fisica delle Alte Energie è quello di creare tracciatori più sottili possibile, tali da minimizzare la probabilità di scattering multiplo. Un approccio diverso dal modello ibrido di rivelatore, è quello monolitico, per il quale si ha un singolo wafer di silicio in cui devono convivere sia sensore che elettronica di readout. Meno costosi degli ibridi in quanto non necessiterebbero del bump-bonding, i monolitici hanno una depletion-region di un ordine di grandezza più piccola degli ibridi ( $\approx 20 \div 30\mu\text{m}$ ). Il problema di questi rivelatori è che i modelli realizzati fino ad oggi non sono abbastanza resistenti alla radiazione per ambienti come HL-LHC.



## Capitolo 3

# Il Tracciatore Interno di ATLAS per HL-LHC

Essendo l'obiettivo di questa tesi quello di testare i moduli del rivelatore a pixel che andrà a sostituire quello esistente, in questo capitolo si descrive il layout del futuro tracciatore, noto come ITk, si forniscono informazioni aggiuntive rispetto ai moduli di cui sarà costituito e si riassumono brevemente le fasi del processo di costruzione.

### 3.1 Schema del tracciatore ITk

Il nuovo Inner Tracker andrà a rimpiazzare l'attuale Inner Detector (ID) e sarà completamente costituito da rivelatori al silicio.

La figura 3.1 mostra uno schema di un quadrante del nuovo detector: l'ITk è composto da due sistemi, un rivelatore a pixel che è circondato da un rivelatore a micro-strip.

Nel barrel il rivelatore a pixel è composto da 5 strati concentrici, in cui i moduli più esterni sono inclinati per ridurre l'angolo tra particelle incidenti e la superficie dei moduli. Questa disposizione permette di ridurre notevolmente la quantità di materiale semiconduttore attraversato dalle particelle da tracciare, riducendone lo scattering multiplo.

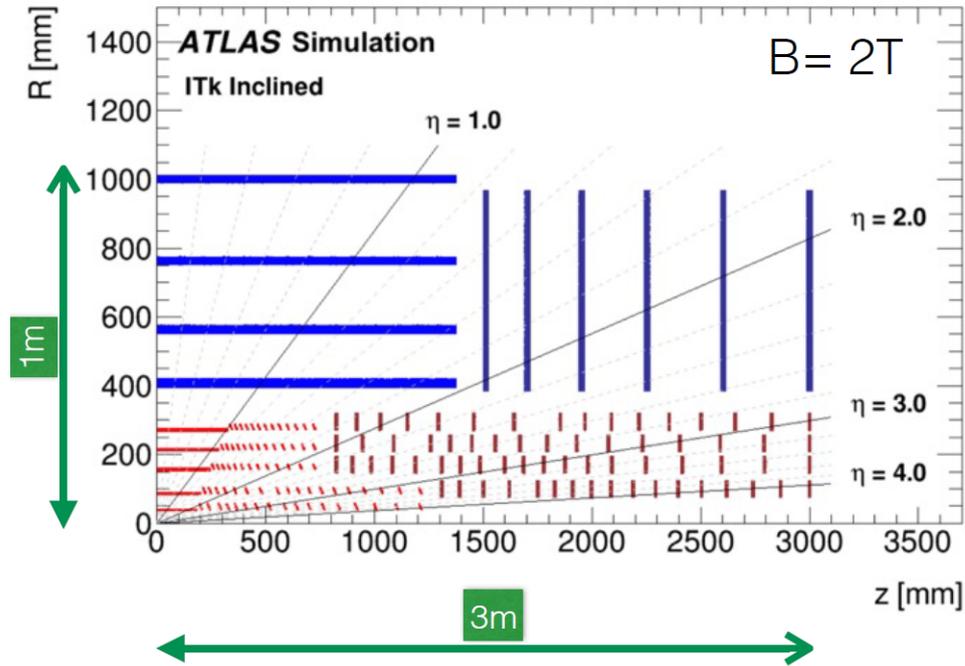


Figura 3.1: Quadrante del layout completo dell'ITk per HL-LHC. Si usa la pseudorapidità  $\eta$  come coordinata spaziale angolare al posto dell'angolo relativo  $\theta$  tra particella e fascio (jn rosso i moduli a pixel, in blu quelli a strip).

I moduli dell' end-cap sono incollati su supporti a forma di anello e si estendono nella direzione "in avanti" rispetto al punto d'interazione tra i fasci.

ITk si estenderà fino a  $|\eta| = 4$ , dove  $\eta$  è la pseudo-rapidità definita come

$$\eta = -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (3.1)$$

dove  $\theta$  è l'angolo tra il momento  $\vec{p}$  della particella e l'asse del fascio. Per confronto, l'attuale Inner Detector copre la regione corrispondente a  $|\eta| < 2.7$ . La superficie dei singoli pixel sarà di  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  o  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ , contro i  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$  dell' ID ( $50 \times 200 \mu\text{m}$  nel layer più interno), per un'area attiva totale di  $12.7 \text{ m}^2$ , contro i  $\sim 2 \text{ m}^2$  dell'ID.

I rivelatori a strip sono divisi in 4 strati nel barrel e 6 negli end-caps, ortogonali ai precedenti. Come si vede in figura 3.1, i rivelatori a strip ricoprono l'area con

pseudorapidità  $|\eta| < 2.7$ : l'area attiva di strip sarà di  $165 \text{ m}^2$ , contro i  $60 \text{ m}^2$  dell'ID.

Siccome il tempo di vita dei rivelatori aumenta in modo inversamente proporzionale alla distanza dalla beam-pipe, i primi strati sono quelli che sopravvivono meno di tutti: è previsto che i due strati più interni del rivelatore a pixel siano sostituiti dopo metà del tempo previsto per il funzionamento di HL-LHC.

## 3.2 Moduli Ibridi del tracciatore a pixel

A causa della loro maggiore resistenza alla radiazione, lo strato più interno del barrel del rivelatore a pixel, dove la fluena di particelle prevista è di  $2 \div 3 \cdot 10^{16} \text{ 1 MeV n}_{eq}/\text{cm}^2$ , sarà realizzato con moduli ibridi in architettura 3D. Il resto del rivelatore sarà costituito da moduli planari n-in-p, come descritto nel paragrafo 2.4. Lo spessore dei sensori di silicio sarà inferiore a quello che c'è attualmente nell'ID ( $100\text{-}150 \text{ }\mu\text{m}$  rispetto a  $250\text{-}300 \text{ }\mu\text{m}$ ). Sia i sensori 3D che i sensori planari saranno accoppiati a un chip di front-end di nuova generazione: si passerà dalla tecnologia CMOS a  $130 \text{ nm}$  a quella a  $65 \text{ nm}$ , e il chip dovrà sostenere un flusso di radiazione più importante. Il nuovo chip sarà utilizzato dai tracciatori sia di ATLAS che di CMS e nasce da una collaborazione nota come RD53, da cui prende il nome. Le sue caratteristiche più importanti sono riportate in figura 3.2: le dimensioni del chip RD53 sono approssimativamente di  $2\text{x}2 \text{ cm}^2$  per un numero di pixel di circa  $1.5 \cdot 10^5$ . La logica di periferia del chip, che porta ai moduli le informazioni di trigger e trasferisce in uscita le coordinate dei pixel colpiti, dovrà avere capacità di banda molto maggiore dei chip utilizzati attualmente.

Per ogni pixel colpito, cioè dove si registra un impulso sopra soglia, RD53 immagazzina in 4 bit anche l'informazione del Time over Threshold (ToT), proporzionale all'ampiezza del segnale e misurata in numero di cicli di clock.

## RD53 Collaboration (CERN, Universities and Research institutes in EU and USA)

### CHIPIX65 Project (Collaboration among INFN and Italian Universities)

- Focussed R&D programs to develop **pixel chips for extreme rate and radiation** (ATLAS/CMS phase 2 upgrades)
- Extremely challenging requirements for ATLAS/CMS:
  - Small pixels: **50x50um<sup>2</sup>** (25x100um<sup>2</sup>) and larger pixels
  - Large chips: ~2cm x 2cm
  - Hit rates: **2(3) GHz/cm<sup>2</sup>**
  - Radiation: **1Grad**, 2 10<sup>16</sup> neu/cm<sup>2</sup>
  - Trigger: **1MHz**, 10-12.5 us (~100x buffering and readout)
  - **Low power** - Low mass systems
- Baseline technology: **65nm CMOS**
- Plans: CHIPIX65 demonstrator end of 2015 + RD53 full scale demonstrator pixel chip end of 2016

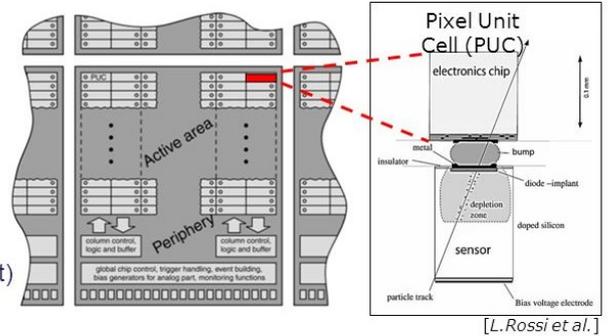


Figura 3.2: Schema e dettagli di lavoro del chip di front-end RD53.

### 3.3 Procedura di costruzione

La costruzione del rivelatore a pixel di ITK comprende diverse fasi, alcune delle quali realizzabili solo dall'industria, e altre che possono essere affrontate anche nei laboratori delle università e degli enti di ricerca.

Il wafer di silicio (sensore) che rappresenta la parte attiva del rivelatore, con i relativi impianti per la definizione dei pixels e del contatto per la tensione di bias, sono realizzati presso fonderie specializzate. Lo stesso vale per il chip di front-end: mentre il suo design ha visto la collaborazione di ricercatori e industria, la realizzazione è delegata a quest'ultima. Infine, anche la deposizione dei "bumps" per il contatto elettrico e l'accoppiamento tra sensore e chip di readout ("flip chip") richiede precisioni e infrastrutture tipiche dell'industria.

I laboratori di ricerca intervengono praticamente a partire dal "bare module", ossia l'insieme di sensore e chip di readout collegati via bump-bonding. In ITK, i moduli saranno di diverse dimensioni: costituiti da un wafer accoppiato a un solo chip, o "single chip", per i sensori 3D; da wafer accoppiati a due ("dual chip") o quattro chip ("quad") per i planari. Questo significa che l'elemento più piccolo da

realizzare avrà dimensioni variabili tra  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ,  $2 \times 4 \text{ cm}^2$  e  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ .

I bare module non presentano connettori e possono essere analizzati solo con l'ausilio di una probe station. Per poterli utilizzare è necessario incollarli e collegarli a un supporto con circuito stampato (flex) che ne permette l'accoppiamento con alimentatori e canali di configurazione e lettura dei registri del chip di FE. L'incollaggio tra bare module e flex avviene dal lato del sensore, e i contatti elettrici sono realizzati per mezzo di sottili fili di alluminio (wire-bonds mostrati in figura 3.3). Questo processo è noto come "module assembly". Alla fine del pro-

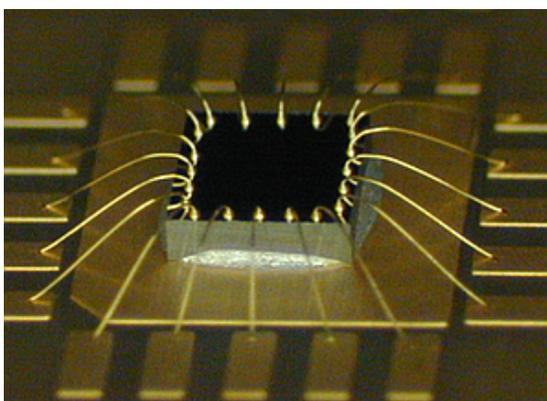


Figura 3.3: Risultato del wire bonding di un modulo a semiconduttore.

cesso di assemblaggio si ottiene un modulo che può essere testato e sottoposto a stress test per verificarne la robustezza. Nella fase di test in laboratorio le connessioni per le alimentazioni e i canali di readout sono realizzate attraverso connettori temporanei.

Tutti i moduli prodotti per ITK dovranno essere individualmente testati al fine di selezionarli per la costruzione del rivelatore finale. I test sono volti a verificare la qualità del sensore, del chip di readout, e del loro collegamento. I moduli di buona qualità saranno incollati ai supporti del rivelatore finale ("half-ring" per gli end-cap, "staves" per il barrel) che includono le connessioni ai canali di alimentazione e alle linee di readout. Questo processo è noto come "loading".

L'ultima fase di costruzione del rivelatore consiste nell'integrazione finale di tutte le parti e dei servizi necessari, incluso il sistema di raffreddamento.

In ogni fase della costruzione si effettuano misure volte ad assicurare la qualità del prodotto prima di passare a quella successiva.

### **3.4 Ruolo dell'Italia**

L'Italia contribuisce al progetto ITK con la costruzione di uno degli end-cap. Le Sezioni dell'INFN di Milano e Genova si occuperanno dell'assemblaggio dei moduli (dal "bare" al "flex"); altre sezioni, tra cui Bologna, dei test di qualità ai moduli stessi; le sezioni di Genova e Lecce si occuperanno del "module loading", e l'integrazione finale sarà realizzata a presso i laboratori di Frascati.

## Capitolo 4

# Automazione del processo di qualifica dei moduli a pixel di ITk

In quest'ultimo capitolo si trova l'espressione del lavoro da me svolto. Il mio compito consiste nel rielaborare ed estendere un programma su pc già esistente che, inizialmente, è capace di misurare le curve IV di un sensore di silicio per volta. Il problema cui ho dovuto rispondere è la difficoltà pratica nella ripetizione di questo procedimento, che deve essere effettuato tre volte su ognuno dei circa 2000 moduli da qualificare. Il mio intervento ha velocizzato il processo di scansione, rendendo possibile effettuare la misura delle caratteristiche in successione su quattro moduli connessi a una nuova scheda per la distribuzione della tensione di Bias. Inoltre, il nuovo programma registra anche la temperatura del modulo al momento dello scan IV.

Nei seguenti paragrafi è esposta la procedura di test che si seguirà a Bologna, sono descritti gli strumenti utilizzati nel laboratorio in cui ho operato e i tools software e hardware impiegati, e in particolare il mio contributo.

### 4.1 Test di qualificazione da effettuare a Bologna

Prima di arrivare a Bologna, i moduli provenienti dai siti di assemblaggio saranno già stati testati a temperatura ambiente. In particolare, la loro caratteristica IV

sarà già nota e salvata su database. I test di qualità che si effettueranno Bologna comprendono diverse fasi:

1) alla ricezione del modulo si verifica che non siano intervenuti danni nel trasporto;

2) I moduli sono sottoposti a cicli termici tra -55 e 60 °C all'interno di una camera climatica;

3) I moduli sono ri-testati con la stessa procedura implementata prima del ciclo termico, per valutarne gli effetti;

4) I moduli sono raffreddati e sottoposti a radiazione da sorgente o tubo a raggi-X per verificarne le prestazioni in condizioni di funzionamento reale.

I test di ricezione, effettuati a temperatura ambiente, includono scan IV per verificare l'integrità del sensore, e test elettrici ai chip di readout che comprendono misure di rumore. Confrontando il rumore di ciascun pixel con e senza tensione di bias nel sensore si può anche verificare l'accoppiamento tra pixel del sensore e del chip, in quanto svuotando il sensore si modifica la capacità di ingresso al chip di readout. Per tutta la durata delle scansioni i moduli sono tenuti al buio per leggere correttamente la corrente di leakage. Lo stress termico è volto a verificare la robustezza del modulo rispetto a distorsioni meccaniche che possono verificarsi in due casi principali: una mancanza di corrente (power cut), o un problema nel sistema di raffreddamento, durante le fasi di funzionamento. Nel primo caso, poiché il sistema di raffreddamento ha una certa inerzia, al mancare della corrente i chip di readout smettono improvvisamente di dissipare calore e tutto il detector scende rapidamente in temperatura; nel secondo caso avviene l'opposto.

I risultati dei test di qualità sono di nuovi immagazzinati, per ciascun modulo e per ogni passo, nel database. Queste informazioni sono utilizzate sia per individuare possibili criticità nel processo di produzione, che per scegliere i moduli da montare sui supporti.



Figura 4.1: Setup per la misura della caratteristica IV.

## 4.2 Misura della caratteristica IV

Inizialmente ci si aspetta che i moduli planari di ITk non raggiungano il breakdown prima di 400 V. Anche al massimo di invecchiamento da radiazione, l'alimentazione non potrà superare gli 800-1000 V.

Nelle misure della curva IV dei sensori si utilizza un Source Meter Keithley 2410, controllato da computer via interfaccia GPIB: questo strumento combina una sorgente molto stabile di tensione o corrente e un multimetro di alta precisione. La massima tensione erogabile è di 1 kV.

In pratica, una differenza di potenziale è generata tra due terminali, mentre si misura la corrente tra i terminali stessi, come mostrato in figura 4.1. La corrente di leakage è misurata con una precisione che varia a seconda della corrente stessa.

La parte software, invece, comprende uno script realizzato in ambiente Python che, all'inizio del mio lavoro di tesi, già esisteva. Python è un linguaggio di programmazione ad alto livello che supporta diversi paradigmi di programmazione [5]. Il programma è in grado di comunicare direttamente con il Source Meter grazie alla

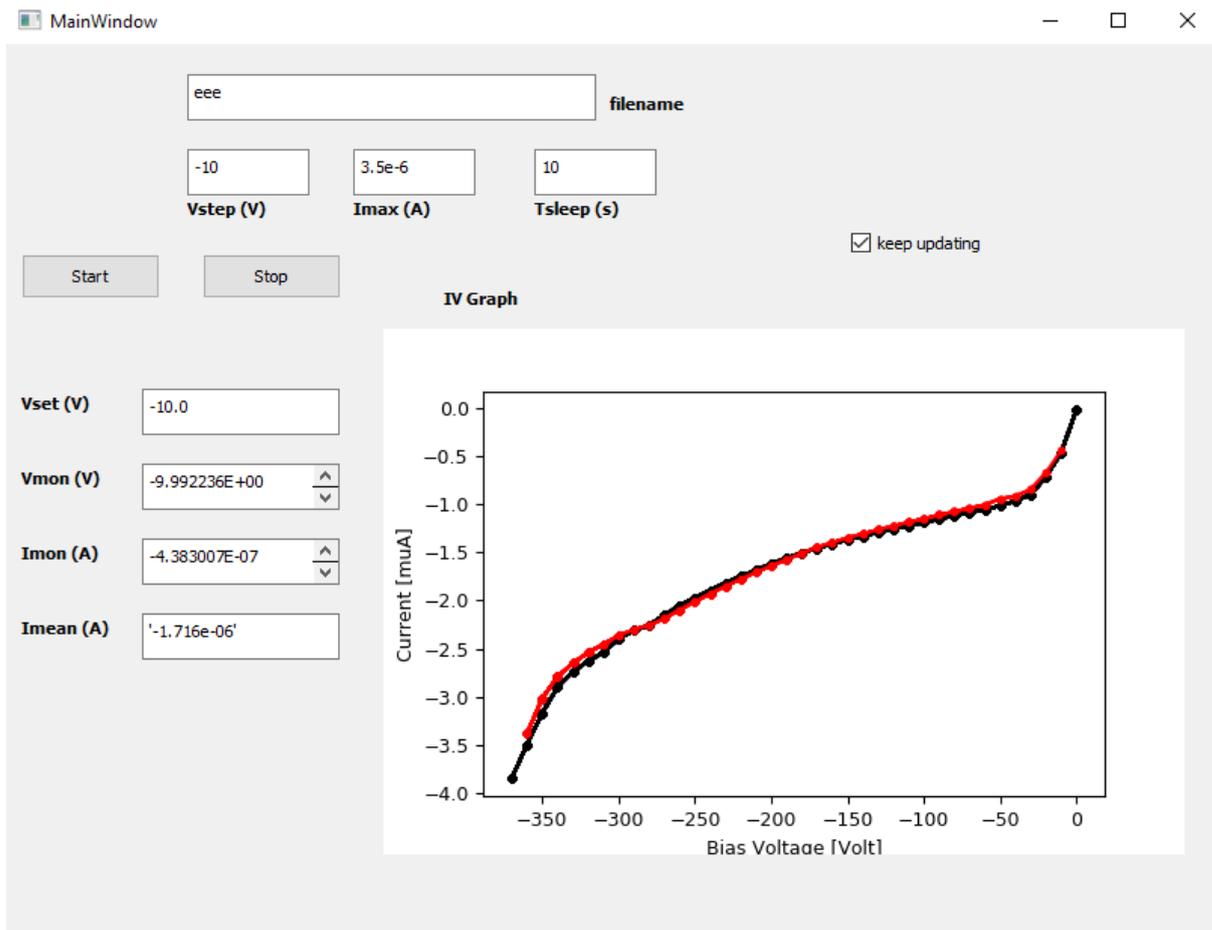


Figura 4.2: GUI del programma preesistente con un esempio di scansione effettuata su un sensore monolitico.

libreria pyVisa [6] importata nel programma Python impiegato. Tramite il software PyQt4 Designer, offerto dall'omonima libreria [7], si è realizzata la grafica che lo script utilizza per inizializzare i parametri della scansione: la GUI (Graphical User Interface) è esposta in figura 4.2. Lo sperimentatore inserisce manualmente il passo di tensione del test,  $V_{step}$ , cioè il valore che viene aggiunto dopo ogni misura, un valore di corrente massima,  $I_{max}$ , che non si vuole superare per salvaguardare il sensore, il tempo di attesa tra settaggio della tensione e lettura della corrente,  $T_{sleep}$ , e il nome del file di testo in cui sono salvati i risultati. La scansione inizia quando viene premuto il pulsante di start; la curva IV risultante è mostrata nella

canvas e l'esecuzione del programma termina quando viene premuto il pulsante di stop, o quando la curva IV è stata disegnata con completezza: ogni curva parte da 0 V, arriva al breakdown o alla corrente massima, e torna indietro al punto di partenza. Le curve corrispondenti agli intervalli  $0 - V_{max}$  e  $V_{max} - 0$  sono differenziate con un colore diverso (nel caso in figura in nero è la curva di andata e in rosso di ritorno).

I valori  $V_{set}$ ,  $V_{mon}$ ,  $I_{mon}$  e  $I_{mean}$  servono a monitorare i valori correnti della tensione impostata, di quella effettivamente erogata, della corrente misurata e del valore medio delle correnti misurate precedentemente, che il programma utilizza per trovare il breakdown.

I limiti del suddetto programma sono diversi:

- un'unica misura di corrente è effettuata per ogni valore di tensione impostato;
- il tempo della curva di andata è uguale al tempo della curva di ritorno: poiché la seconda curva è meno importante ai fini della caratterizzazione, è possibile velocizzare il processo diminuendo il tempo impiegato per quest'ultima;
- non viene effettuata alcuna misura sulla temperatura;
- il nome del file su cui vengono salvati i risultati è da impostare ogni volta che si effettua una scansione.

### 4.3 Dispositivo per la distribuzione di $V_{bias}$

Poiché abbiamo a disposizione un solo Source Meter, il laboratorio di elettronica dell'INFN di Bologna ha disegnato una nuova scheda PCB, volta a distribuire la tensione di bias ad almeno quattro moduli, sia in parallelo che individualmente. Il piazzamento delle componenti è mostrato in figura 4.3. La scheda prevede di poter abilitare o disabilitare individualmente 4 uscite (connettori LEMO J2-J5) la tensione proveniente dal connettore di input J1. A queste uscite saranno collegati i moduli da testare. La tensione viene commutata attraverso 4 relays (REL1-REL4) che vengono pilotati con l'ausilio di 4 transistor (T1-T4): sulla base di questi transistor arrivano dei segnali digitali provenienti dal connettore J6. I segnali digitali devono essere forniti dall'esterno, da una qualunque scheda

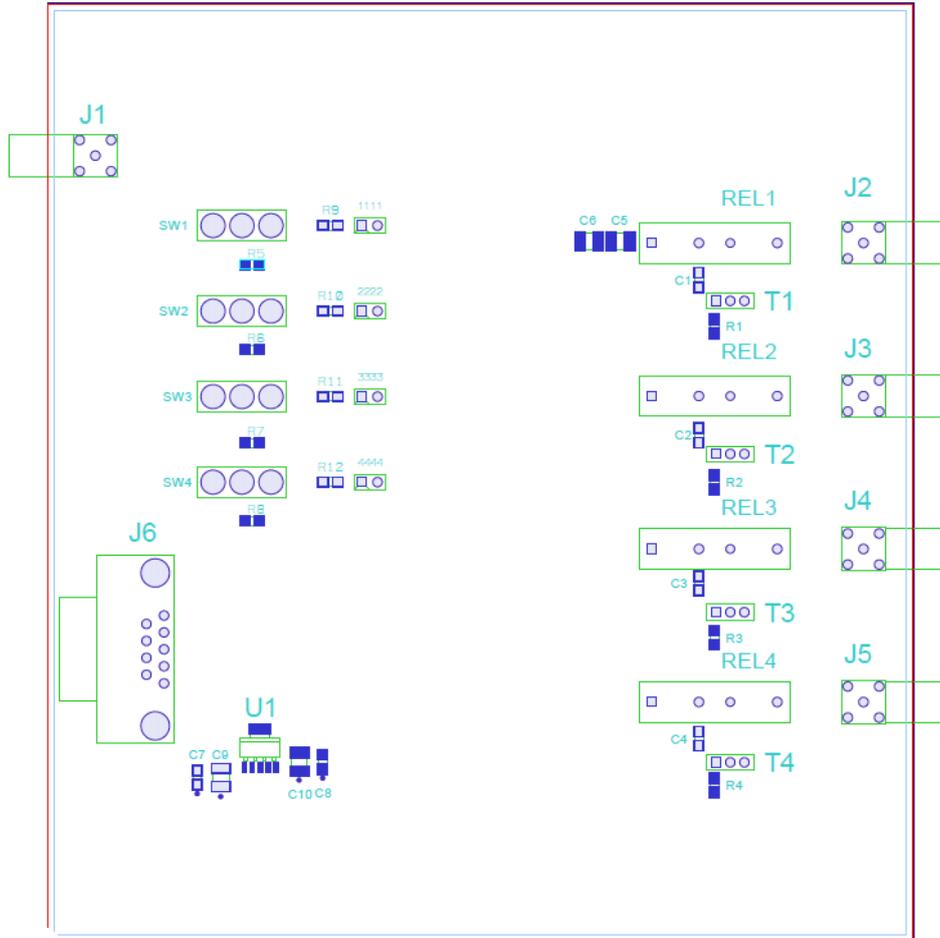


Figura 4.3: Schema, realizzato con autoCAD, del dispositivo per la distribuzione di  $V_{bias}$  impiegato per le misure delle caratteristiche I-V dei moduli di ITk a Bologna.

di I/O pilotabile da computer (nel nostro caso Arduino). Le resistenze R1-R4 hanno lo scopo di limitare la corrente fornita dalle uscite digitali della scheda di I/O utilizzata, ma di permettere al tempo stesso di far funzionare i transistor da interruttore, portandoli dall'interdizione alla saturazione. Gli switch «SW1-SW4» hanno la stessa funzione dei segnali digitali e lavorano in parallelo ad essi.

I relays devono poter sostenere fino a 800 V senza alterare la misura della corrente nè quando sono aperti nè quando sono chiusi: per evitare correnti "parassite" non sono stati scelti relays a semiconduttore, ma i Reed Relays

SHV05\_1A85\_78D4K, che possono sostenere fino a 1000 V e non danno problemi di surriscaldamento in quanto assorbono solo  $\sim 35$  mA [8].

Per testare il corretto funzionamento delle schede, e quindi assicurare che il progetto risponda ai requisiti prima della realizzazione finale, il laboratorio di elettronica dell'INFN di Bologna ha realizzato un prototipo, che è mostrato in figura 4.4. Esso dispone di soli due canali di output. Il circuito è implementato

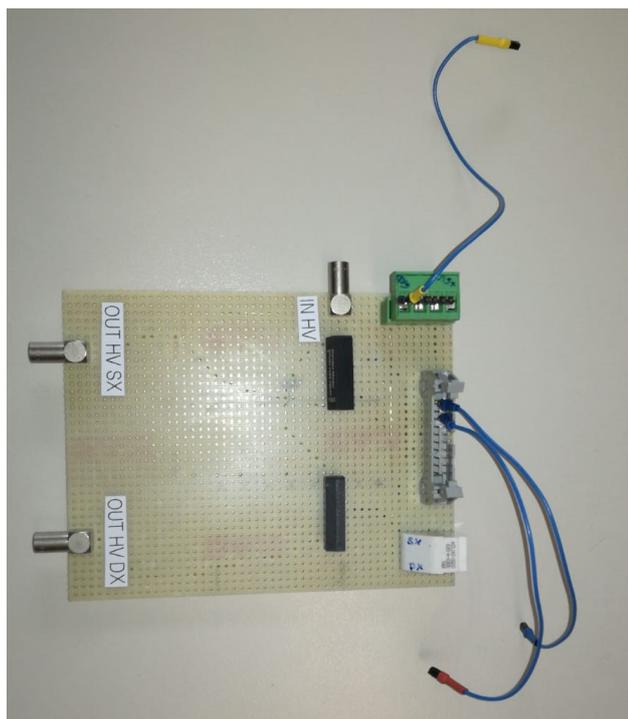


Figura 4.4: Immagine del prototipo a due canali impiegato per il mio lavoro.

su una millefori in cui sono montati un LEMO di input, due connettori LEMO di output collegati ai rispettivi relays, uno switch per comandarli, un connettore per i pin di output della scheda I/O e un connettore per l'alimentazione a 5 V.

Il prototipo è stato testato per verificare che il suo uso non alteri la misura della corrente di leakage. Per tale scopo sono stati effettuati test su un modulo "dual" della sezione di Genova, identico a quelli montati su IBL in ATLAS: i risultati sono esposti in figura 4.5. Il test ha compreso una scansione utilizzando, in ordine: una connessione diretta tra power supply e modulo; la scheda intermedia

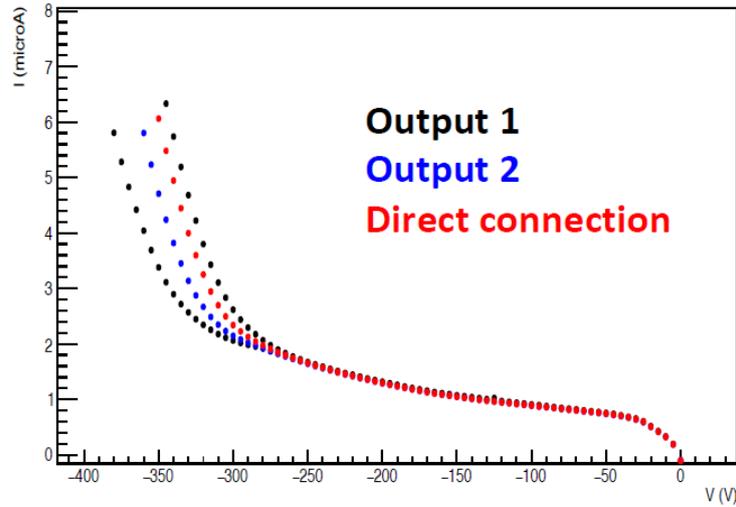


Figura 4.5: Curve IV di un modulo "dual" identico a quelli montati su IBL ottenute tramite collegamento diretto HV-supply e modulo (in rosso), e poi inserendovi il prototipo per la distribuzione della tensione abilitando un'uscita alla volta (nero e blu).

con solo un canale di output attivo alla volta; infine di nuovo la connessione diretta senza prototipo. Durante il test quest'ultimo è stato ricoperto da una coperta di pelle nera, ma non vi erano controlli sulla temperatura. Le curve risultanti sono compatibili tra loro entro la precisione richiesta.

## 4.4 Misura della temperatura

Come verrà descritto nel paragrafo 4.5, al programma è stata aggiunta anche la funzione di misurare la temperatura a cui si trova il modulo sotto test. Infatti, come spiegato nel paragrafo 2.3.2, la corrente di leakage dipende fortemente dalla temperatura. Lo strumento utilizzato per questo scopo è una sonda Pt100 che appartiene alla famiglia dei sensori PTF: questi sensori sono costituiti da una termoresistenza al platino con resistenza nominale definita ai sensi della norma IEC 751 (EN 60751). Nel caso della Pt100 si ha una resistenza pari a 100  $\Omega$  a una temperatura di 0°C. La sonda da me utilizzata è il modello DIN EN 60751 la cui

resistenza ha la dipendenza dalla temperatura mostrata in figura 4.6.

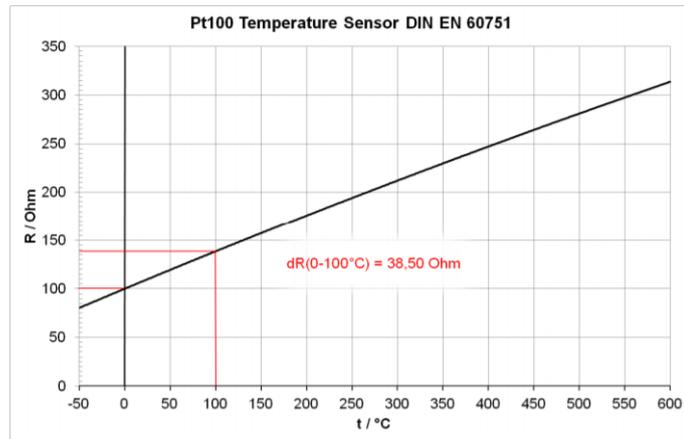


Figura 4.6: Dipendenza caratteristica R-T della sonda Pt100 DIN EN 60751 [9].

La Pt100 è letta da uno strumento commerciale della famiglia LucidControl [10], direttamente collegato al pc tramite connettore USB come si vede in figura 4.6, che altro non è che un dispositivo I/O USB Plug-and-Play che permette al computer di acquisire e controllare dati analogici e digitali. Lo strumento da me impiegato, modello RTD4, nelle condizioni di lavoro in cui ho operato, presenta una risoluzione in temperatura del decimo di °C.

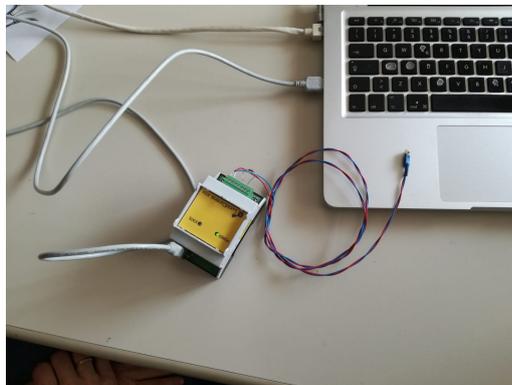


Figura 4.7: Dispositivo LucidControl RTD4 con la Pt100 collegato al pc tramite USB.

La connessione tra software e RTD4 è resa possibile includendo nel programma di Python la libreria LucidIo fornita dal produttore.

## 4.5 Integrazione

Il mio lavoro è partito dall'ampliamento del codice già esistente di Python e successivamente ha visto l'inserimento di nuove componenti elettroniche. Di seguito sono esposte le modifiche che ho apportato al programma:

- invece di una sola misura di corrente per ogni valore di tensione, si ripetono  $N$  letture della corrente per ogni valore di  $V_{set}$  e la corrente media è associata alla tensione  $V_{set}$  insieme alla sua deviazione standard. Il numero  $N$  è un parametro di inizializzazione presente nella nuova interfaccia grafica. La realizzazione pratica impiega un ciclo for che itera il processo di misura della corrente  $N$  volte. Alla fine del ciclo il valore medio delle correnti è stampato nell'etichetta  $I_{mon}$  e salvato su file;
- il controllo dei transistor presenti sulla scheda descritta nel paragrafo 4.3 è realizzata con l'impiego dei canali di digital I/O di Arduino. Esso è una piattaforma hardware composta da una serie di schede elettroniche dotate di un micro-ctrllore [11]. Grazie ad Arduino il programma riesce a svolgere intelligentemente fino a quattro scansioni sequenzialmente. Il firmware che permette la comunicazione tra pc e la scheda di Arduino si chiama Firmata [12]. Per far sì che il pc comunichi con Arduino come se fosse una porta seriale è necessario includere nello script di Python la libreria pyFirmata [13].
- è stata inserita la misura della temperatura. All'inizio e alla fine di ogni curva viene misurata la temperatura, che è trascritta nel file di testo dove sono salvati i risultati.
- si è modificata la GUI, tramite il pyQt4 designer fornito dall'omonima libreria, come mostrato in figura 4.8. La nuova interfaccia presenta diverse nuove caselle di testo etichettate in base alla funzione che hanno: la casella Samples rappresenta il numero  $N$  di misure di corrente effettuate per ogni valore di tensione; quattro caselle di testo (Module 0-4) permettono allo sperimentatore di inserire il nome dei moduli di cui vuole misurare le curve IV.

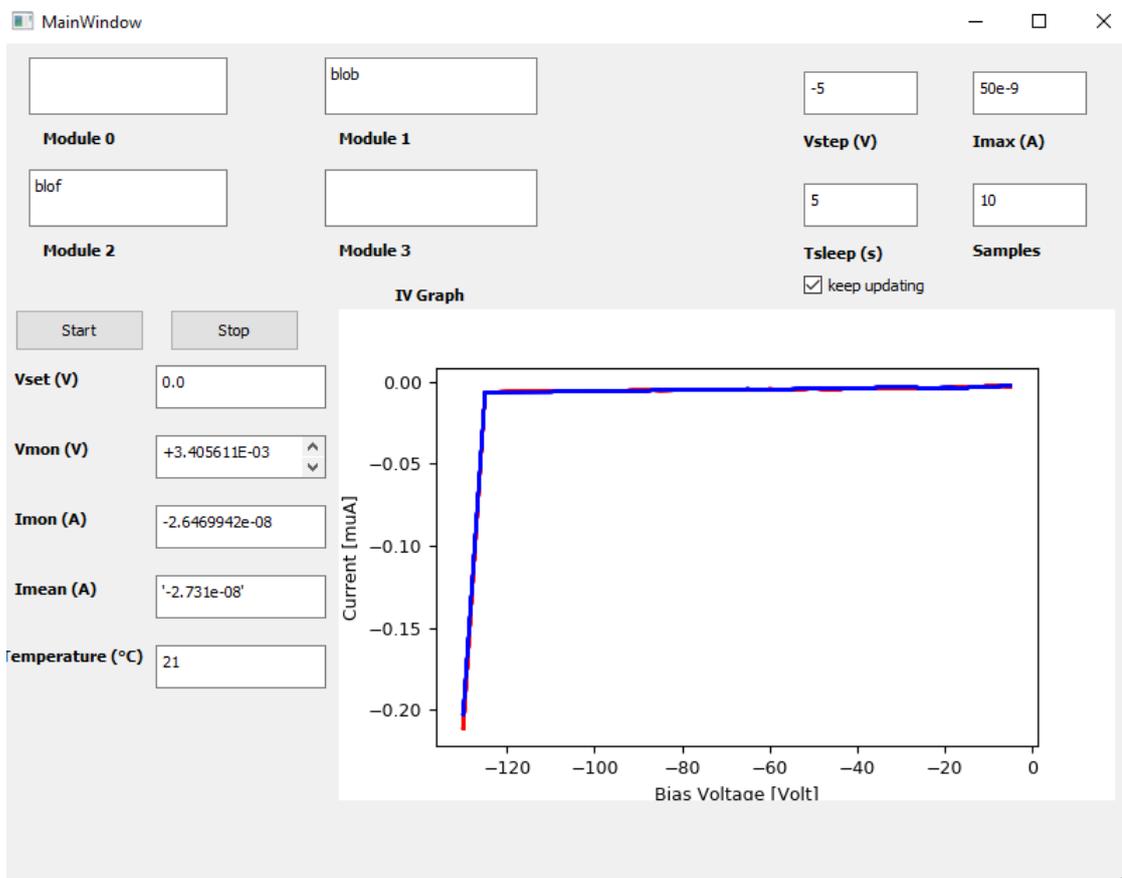


Figura 4.8: Nuova GUI del programma.

Il nome dei moduli sarà anche il nome dei file di testo dove verranno salvati i relativi risultati. Caselle vuote specificano che non vi è associato alcun modulo; è stata aggiunta la casella corrispondente alla temperatura, che il programma misura e mostra; le altre caselle sono rimaste intatte e hanno la stessa funzione della versione precedente. Nel grafico sono stampate le varie curve IV corrispondenti ai moduli collegati, ognuna con un colore diverso. Sono mostrate anche le barre d'errore sulla corrente, ma nel caso in figura non si riescono ad apprezzare.

Il vantaggio di usare Arduino è stato quello di poter controllare i relays direttamente tramite i suoi digital PINs I/O, che erogano fino a 5 V. Nel nuovo script di Python, tramite pyFirmata è possibile controllare e modificare lo

stato dei digital pin di Arduino, senza dover passare tramite l'IDE (Integrated Development Environment) dedicato. Quindi il programma riesce ad effettuare la selezione dei moduli spegnendo ed accendendo, ad ogni curva I-V, il relay corrispondente al precedente e al successivo modulo, permettendo di effettuare le misure delle caratteristiche in successione. Questo permette di risparmiare tempo e fatica quando dovranno essere testati tutti i 2000 moduli, riducendo il numero di interventi manuali da parte di chi eseguirà i test. Il programma accende/spegne i pin di Arduino, e procede quindi alla scansione dei moduli, solo se la corrispettiva casella di testo è stata compilata con il corrispondente nome: se nessun nome viene inserito, il programma non interagisce con quel pin.

# Conclusioni

Il lavoro da me svolto ha contribuito a velocizzare la procedura di test dei moduli del tracciatore che verrà installato in ATLAS per HL-LHC. Con successo, sono riuscito a mettere insieme e controllare da computer le diverse parti di un sistema che può alimentare fino a quattro moduli contemporaneamente con un unico power supply e svolgere le misure delle caratteristiche I-V sugli stessi in maniera sequenziale. In particolare, ho migliorato un programma Python preesistente integrandovi delle misure di temperatura e il controllo dei relays di una nuova scheda per la distribuzione della tensione di bias, disegnata dal laboratorio di elettronica. Quest'ultimo compito è realizzato tramite i pin di I/O digitali di un Arduino, controllati dallo stesso programma Python. Il mio lavoro ha anche contribuito a testare un prototipo della nuova scheda, ora in fase di realizzazione.

Il risultato conseguito aiuterà la sezione dell'INFN di Bologna a qualificare più velocemente ed efficientemente i 2000 moduli che in futuro qui arriveranno. Inoltre, grazie alla costante supervisione dei miei relatori ho appreso molte informazioni su LHC, il rivelatore ATLAS e sulla Fisica delle Alte Energie in generale, che hanno contribuito alla mia formazione personale e rappresentano un patrimonio importantissimo per il mio futuro. Questo lavoro di tesi conclude il mio percorso di laurea triennale e segna l'inizio di una prospera e avventurosa carriera.



# Bibliografia

- [1] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/LuminosityPublicResults>
- [2] [http://meroli.web.cern.ch/Lecture\\_StragglngFunction.html](http://meroli.web.cern.ch/Lecture_StragglngFunction.html)
- [3] <http://cds.cern.ch/record/2310669/files/ATL-PHYS-SLIDE-2018-144.pdf>
- [4] <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>
- [5] The ATLAS Collaboration: Technical Design Report of the ATLAS Pixel Detector, CERN/LHCC/98-13 (1998).
- [6] <https://www.python.it/about/>
- [7] <https://pyvisa.readthedocs.io/en/master/>
- [8] <https://wiki.python.org/moin/PyQt>
- [9] <https://www.electronics-distributor.com/pdf-39/SHV05-1A85-78D2K.pdf>
- [10] <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1554/0900766b81554042.pdf>
- [11] <https://www.lucid-control.com/online-documentation/documentation-lucidcontrol-rtd-input-usb-module-content/rtd-input-usb-module-operation/>
- [12] <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [13] <https://www.arduino.cc/en/reference/firmata>
- [14] <https://media.readthedocs.org/pdf/pyfirmata/latest/pyfirmata.pdf>



# Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va alla mia correlatrice, la Dottoressa Carla Sbarra, per avermi assistito con estrema professionalità, pazienza ed entusiasmo dal primo giorno. La ringrazio per la costante attenzione, presenza e cura per i dettagli con cui ha supervisionato il mio lavoro. La gioia che è stata capace di trasmettermi ha reso tutto il percorso davvero divertente e stimolante, oltre che produttivo. Il suo appoggio è stato indispensabile. La ringrazio infinitamente e per sempre per l'aiuto concessomi e la premura nei miei confronti.

Il secondo e altrettanto caldo ringraziamento va al Professor Antonio Zoccoli, per il supporto che mi ha fornito durante il periodo della laurea triennale e del periodo di tesi. Sono entusiasta e felice di averlo avuto accanto nella figura di professore prima, e poi relatore. La sua esperienza e professionalità hanno contribuito a rendere la mia presenza qui a Bologna eccitante e produttiva.

Gli insegnamenti di entrambi saranno per me un patrimonio importante per il futuro e per la mia carriera.