

UNIVERSITÀ DI PISA



DIPARTIMENTO DI FISICA *E. Fermi*

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN FISICA

---

**Analisi del materiale del  
rivelatore di vertice di Belle II e  
caratterizzazione di prototipi per  
possibili sviluppi futuri**

---

**Relatori**

Prof. Stefano BETTARINI  
Dott.ssa Giulia CASAROSA

**Candidato**

Alberto LORENZINI  
585864

Anno Accademico 2020–2021

*Ai miei genitori*

## Sommario

Questa tesi si articola in due argomenti principali: nella prima parte analizzo il contenuto in materiale del rivelatore di vertice, mentre nella seconda parte presento l'attuale sviluppo di VTX, il rivelatore di vertice a pixels che nel 2026-2027 andrà a sostituire quello attuale VXD.

L'analisi del material budget è stata effettuata confrontando le distribuzioni dei vertici di produzione di coppie  $e^+e^-$  da fotoni convertiti nel materiale di VXD, tra dati e Monte Carlo. I risultati hanno mostrato una sottostima del "material budget" nella geometria della simulazione nella zona di supporto dei 3 layers interni di VXD. Dall'analisi si evince anche una concentrazione nella distribuzione dei vertici vicino al punto di interazione anomala nel MC rispetto ai dati.

Nella seconda parte viene presentata la caratterizzazione del prototipo di modulo per il layer più esterno di VTX. In particolare, ho effettuato un test flessionale della trave di supporto del modulo che ha mostrato una flessione in linea con le aspettative. Il test vibrazionale effettuato sulla stessa trave ha evidenziato che la prima frequenza di risonanza si mostra intorno ai 250 Hz, sopra ai 200 Hz richiesti da specifica. Infine ho caratterizzato il prototipo di circuito flex in rame. Il "diagramma ad occhio" e il test di attenuazione hanno permesso di stimare il mantenimento dell'integrità del segnale fino ad un bit rate di  $\sim 670$  Mbits/s, contro i 320 Mbits/s richiesti da specifica.

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1 Elementi teorici</b>	<b>7</b>
1.1 Programma di fisica a Belle II . . . . .	7
1.2 Interazione dei Fotoni con la Materia . . . . .	10
1.2.1 Produzione di coppie . . . . .	13
<b>2 SuperKEKB e Belle II</b>	<b>17</b>
2.1 B-Factories . . . . .	17
2.2 SuperKEKB . . . . .	18
2.2.1 Background . . . . .	19
2.3 Il rivelatore di Belle II . . . . .	22
2.3.1 Central Drift Chamber: CDC . . . . .	24
2.3.2 Rivelatori Cherenkov: ARICH e TOP . . . . .	26
2.3.3 Electromagnetic Calorimeter: ECL . . . . .	29
2.3.4 Rivelatore di $K_L$ e muoni: KLM . . . . .	30
2.3.5 Sistema di trigger . . . . .	32
2.4 VXD e VTX . . . . .	33
2.4.1 VXD (VerteX Detector) . . . . .	33
2.4.2 Descrizione di VTX . . . . .	40
2.5 Belle AnalysIS Framework II: BASF2 . . . . .	46
2.5.1 Steering file . . . . .	46
2.5.2 Geometria . . . . .	47
2.5.3 Simulazione . . . . .	48
2.5.4 Ricostruzione . . . . .	49
2.5.5 Analisi . . . . .	49
2.5.6 Coordinate . . . . .	50
<b>3 Analisi material budget VXD</b>	<b>52</b>
3.1 Motivazioni dell'analisi . . . . .	52
3.1.1 Metodo dell'analisi . . . . .	52
3.2 Dataset utilizzati . . . . .	53
3.2.1 Modulo di generazione: ParticleGun . . . . .	54
3.2.2 Monte Carlo generico . . . . .	54
3.2.3 Dati . . . . .	55

---

3.3	Ricostruzione di fotoni . . . . .	56
3.3.1	Moduli di ricostruzione . . . . .	56
3.4	Criteri di ottimizzazione . . . . .	58
3.4.1	Energia . . . . .	58
3.4.2	Distribuzione angolare del flusso . . . . .	59
3.4.3	Efficienza di ricostruzione dati e MC . . . . .	64
3.5	Confronto dati - Monte Carlo . . . . .	64
3.5.1	Radiografia di VXD . . . . .	65
3.5.2	Confronto layers e sensori dati-MC . . . . .	68
3.5.3	Distribuzione delle singole coordinate . . . . .	71
3.5.4	Lunghezza di radiazione Dati-MC . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Prototipo modulo VTX L5</b>	<b>77</b>
4.1	Le sfide di VTX . . . . .	77
4.1.1	VTX L5 . . . . .	78
4.2	Scelte progettuali VTX L5 . . . . .	80
4.2.1	Struttura di supporto . . . . .	80
4.2.2	Cold plate . . . . .	83
4.2.3	Power bus . . . . .	84
4.2.4	Material budget . . . . .	86
4.3	Produzione VTX L5 . . . . .	86
4.3.1	Produzione struttura di supporto . . . . .	86
4.3.2	Produzione delle cold plate . . . . .	87
4.3.3	Produzione circuito flex . . . . .	88
4.4	Caratterizzazione meccanica . . . . .	88
4.4.1	Controllo qualità . . . . .	88
4.4.2	Test di flessione . . . . .	98
4.4.3	Confronto con modello simulato . . . . .	106
4.4.4	Test vibrazionale . . . . .	108
4.5	Caratterizzazione elettrica del circuito flex . . . . .	114
4.5.1	Test diagramma ad occhio . . . . .	114
4.5.2	Test di attenuazione . . . . .	116
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>118</b>
<b>6</b>	<b>Appendice</b>	<b>121</b>
6.1	Appendice confronto material budget . . . . .	121
6.2	Appendice caratterizzazioni VTX L5 . . . . .	126
	<b>Bibliografia</b>	<b>130</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>133</b>

# Introduzione

Belle II è il rivelatore di particelle "general purpose" che opera al collisore SuperKEKB, situato al centro di ricerca KEK a Tsukuba, Giappone. SuperKEKB è una *B-Factory* di seconda generazione, costruita sull'esperienza delle B-Factories di prima generazione: PEP-II e KEKB.

Come altri esperimenti di fisica delle particelle, lo scopo di Belle II è quello di cercare evidenze di nuova fisica oltre il Modello Standard. In particolare la ricerca a Belle II si concentra sulla fisica del sapore, tra cui la violazione di  $CP$  o la violazione del sapore leptonic. Belle II si propone anche di ricercare materia oscura e fare misure di QCD. Nel capitolo 1 di questa tesi approfondirò la tematica della fisica a Belle II introducendo gli aspetti teorici della tesi e discutendo l'interazione dei fotoni con la materia, fenomeno alla base dell'analisi presentata nel capitolo 3.

SuperKEKB è un collisore leptonic asimmetrico che fa scontrare fasci di  $e^+e^-$  all'energia nel centro di massa della risonanza  $\Upsilon(4S)$ . La  $\Upsilon(4S)$  decade nel 96% dei casi in una coppia di mesoni  $B$ , di cui circa la metà della volte in  $B^0 - \bar{B}^0$  e l'altra metà in  $B^+ - B^-$ . Il fascio di elettroni ha energia 7 GeV, quello di positroni 4 GeV. Questa asimmetria fornisce alla  $\Upsilon(4S)$  un boost sufficiente a risolvere in tempo i decadimenti dei  $B$  e rendere possibili le misure delle asimmetrie di CP dipendenti dal tempo.

A differenza degli acceleratori che cercano NP (New Physics) ai massimi livelli di energia consentiti dalla tecnologia attuale, SuperKEKB si pone ai limiti dell'intensità. Il collisore giapponese ha già battuto il record mondiale di luminosità di picco: nel Dicembre 2021 ha raggiunto il livello di  $3.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . L'obiettivo che la collaborazione si è posta è quello di raccogliere  $50 \text{ ab}^{-1}$  durante la vita dell'esperimento. Per farlo SuperKEKB dovrà raggiungere la luminosità di picco di  $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . A tale scopo è stato programmato uno stop della presa dati chiamato LS2 (Long Shutdown 2) tra il 2026 e il 2027, per installare gli aggiornamenti hardware necessari a SuperKEKB per raggiungere la luminosità nominale. Per raccogliere i dati prodotti dall'acceleratore, Belle II è composto da un rivelatore di vertice al silicio chiamato VXD, su cui si concentra la mia tesi. Esternamente a VXD si trova la camera a deriva CDC, oltre la quale sono posti i due rivelatori Cherenkov necessari all'identificazione delle particelle: TOP e ARICH. Il rivelatore si completa con il calorimetro elettromagnetico ECL e con KLM (il rivelatore di  $\mu$  e  $K_L$ ). La descrizione del rivelatore verrà approfondita nel capitolo 2, insieme a quella di SuperKEKB e di BASF2, il software utilizzato a Belle II.

Il rivelatore di vertice VXD è composto da due sottorivelatori. PXD è un rivelatore a pixel che compone i primi 2 layers. SVD è un rivelatore a strip di silicio a doppia faccia e completa i restanti 4 layers. La geometria che descrive VXD nelle simulazioni è stata ricavata dai disegni di progettazione. Un'analisi del contenuto in materiale dal punto di vista dell'interazione delle particelle può contribuire a migliorare la geometria implementata nelle simulazioni. Nel capitolo 3 mostro un'analisi basata sulla ricerca di fotoni convertiti in coppie  $e^+e^-$ . L'analisi confronta la distribuzione dei vertici di produzione delle coppie tra i dati raccolti durante il run del terzo quadrimestre 2021 e il Monte Carlo creato a Dicembre 2020.

Allo scopo di rendere le distribuzioni confrontabili, i dati e il Monte Carlo sono stati riscaldati per il flusso di fotoni e per la loro efficienza di ricostruzione. Per rinormalizzare il flusso sono stati utilizzati i fotoni non convertiti ricostruiti con il calorimetro elettromagnetico ECL. Sono state confrontate le distribuzioni negli angoli polare e azimutale ( $\theta$  e  $\phi$ ) dei fotoni non convertiti, tra dati e MC. Le differenze osservate, sono state utilizzate per riscaldare le distribuzioni angolari, nel MC, dei fotoni convertiti in VXD. L'ipotesi è che la distribuzione angolare del flusso tra fotoni convertiti e non convertiti sia la stessa.

Lo stesso concetto è stato applicato per riscaldare i dati in base all'efficienza di ricostruzione dei vertici lontano dal punto di interazione, utilizzando un precedente studio sull'efficienza di ricostruzione dei vertici di produzione dei pioni carichi provenienti da un  $K_S^0$ . L'ipotesi è che, dal punto di vista del rivelatore VXD, non ci siano differenze tra un  $K_S^0$  e un fotone che converte nel materiale e nella ricostruzione della traccia di una coppia  $\pi^+\pi^-$  o di una coppia  $e^+e^-$ .

Per raggiungere gli obiettivi di luminosità istantanea, sarà probabilmente necessaria una riprogettazione della regione di interazione e l'installazione di un rivelatore più robusto nei confronti dei fondi macchina. Per questo motivo sono iniziati gli studi sul nuovo rivelatore di vertice, VTX. Nel capitolo 4 approfondirò la descrizione di VTX spiegando i concetti finora sviluppati.

VTX sarà un rivelatore a pixels in tutti i suoi layers, probabilmente 5, anche se uno studio di fattibilità su VTX a 7 layers è in fase di svolgimento. Sarà equipaggiato con sensori monolithic active pixels (MAPS) chiamati OBELIX, appositamente progettati sotto specifiche del gruppo di R&D di VTX. I sensori OBELIX utilizzeranno la stessa tecnologia CMOS (TowerJazz-180 nm) della famiglia di sensori ALPIDE, utilizzati del rivelatore ITS dell'esperimento ALICE.

Il capitolo 4 prosegue con la caratterizzazione di alcune parti del primo prototipo di modulo per il layer 5 di VTX. Il prototipo è stato progettato ispirandoci ai concetti utilizzati nei moduli esterni di ITS ed i primi componenti sono già stati prodotti. La difficoltà risiede nel consentire una sufficiente stabilità meccanica con strutture il più leggere possibile. Ho seguito la fase di assemblaggio della trave triangolare di supporto in materiali compositi, occupandomi dei controlli qualità e della caratterizzazione meccanica. In particolare, sono stati eseguiti test flessionali e vibrazionali.

Il capitolo si concluderà con la caratterizzazione elettrica del prototipo di

circuito flex in rame (da progetto invece il flex definitivo sarà realizzato con piste in alluminio, allo scopo di limitarne il material budget) per l'alimentazione e la trasmissione dei dati dai sensori OBELIX. In particolare è stato realizzato il cosiddetto "diagramma ad occhio" per valutare l'integrità del segnale ed un test di attenuazione.

La tesi si chiude con il quinto capitolo dedicato alle conclusioni ricavate dai risultati dell'analisi del capitolo 3 e dalle caratterizzazioni descritte al capitolo 4.

# Capitolo 1

## Elementi teorici

In questo capitolo parlerò del programma di fisica dell'esperimento Belle II e a quali settori della ricerca nella fisica delle alte energie è atteso fornire un contributo significativo. Nella seconda parte del capitolo invece introdurrò i concetti teorici alla base dell'analisi proposta in questa tesi nel capitolo 3.

### 1.1 Programma di fisica a Belle II

L'obiettivo primario di Belle II è quello di trovare evidenze di nuova fisica (NP) nel campo delle alte energie, in particolare nella fisica di sapore, oltre che aumentare la precisione dei parametri del Modello Standard. Belle II, grazie al suo acceleratore SuperKEKB, si spinge ai limiti dell'intensità di eventi, con una macchina che ha già battuto i record di luminosità di picco - registrando a fine dicembre 2021 il valore di  $3.8 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  - e che si prefigge di arrivare all'obiettivo di  $6.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Belle II ha iniziato la presa dati nel 2019.

Il Modello Standard è una delle teorie fisiche con il più alto numero di conferme sperimentali. Tuttavia, esso non dà spiegazione a tutta una serie di fenomeni o di caratteristiche naturali, come ad esempio il fatto che esistano proprio tre famiglie di fermioni e che rispettino una gerarchia di massa precisa, oppure come sia possibile il livello di asimmetria tra materia e antimateria osservato: con le misure fatte sulla violazione di  $CP$  (di cui le B-factories come Belle II sono grandi protagoniste) non trova una spiegazione soddisfacente, essendo prevista di vari ordini di grandezza inferiore rispetto all'universo osservato.

Per cercare di dare una spiegazione a questi fenomeni, sono state elaborate tutta una serie di teorie di NP oltre il Modello Standard, per alcune delle quali Belle II cerca di dare una conferma, o una loro negazione, a livello sperimentale.

Belle II, grazie alla sua luminosità e ad un ambiente molto più pulito rispetto ai rivelatori adronici, si è concentrato sulla ricerca di canali specifici di eventi molto rari che possono dare evidenze indirette di nuova fisica, in particolar modo quelli che riguardano gli accoppiamenti di sapore.

Per ricostruire in modo accurato gli eventi molto rari è di fondamentale importanza una conoscenza la più approfondita possibile della geometria del rivelatore (in Fig. 1.1), ma non solo. Per mitigare lo scattering multiplo è necessario

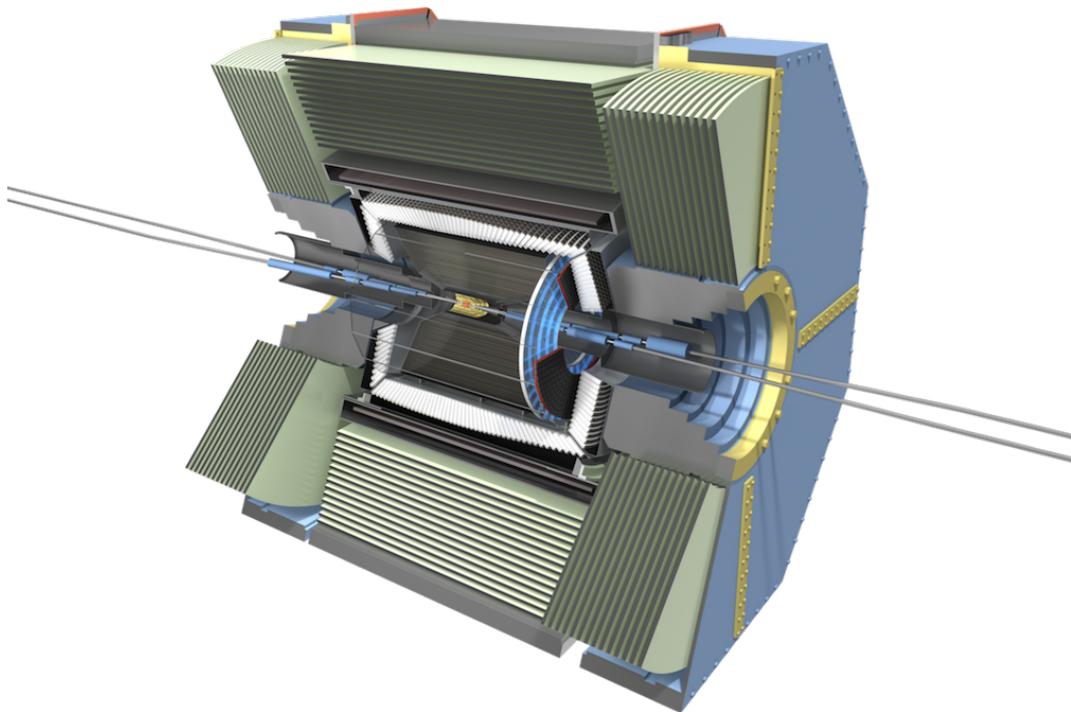


Figura 1.1: Disegno del detector completo di Belle II. Questo detector rende possibile una precisa identificazione di particelle sia cariche che neutre, con energie che possono variare da qualche decina di MeV ad alcuni GeV. Come si può vedere dall'immagine il detector ha inoltre una copertura geometrica, in termini di angolo solido, quasi completa.

mantenere un "material budget" il più basso possibile in modo da perturbare le traiettorie delle particelle il meno possibile.

Grazie all'asimmetria dell'acceleratore di Belle II, tutte le misure dipendenti dal tempo possono essere riconvertite in misure di distanza relativa, ecco perché un'alta risoluzione del tracking (la cui descrizione verrà ripresa all'interno del capitolo 2) è di fondamentale importanza. Inoltre, l'analisi proposta al capitolo 3 di questa tesi ha proprio lo scopo di confrontare la geometria del rivelatore di vertice attuale VXD, dal punto di vista dei dati e del Monte Carlo, in modo da capire in quali punti la descrizione della geometria nominale va eventualmente corretta.

### Misure di fisica del sapore

Il settore in cui Belle II si pone il maggior numero di obiettivi è la fisica del sapore. Questo settore infatti permette di verificare molti parametri che potrebbero dare evidenze indirette di nuova fisica oltre il modello standard. Di seguito elencherò i più importanti argomenti di ricerca per cui Belle II è stato costruito [1].

**Violazione di  $CP$**  Dato che la asimmetria tra materia e antimateria non è spiegabile con le conoscenze attuali di violazione di  $CP$ , Belle II sta cercando di osservare delle possibili discrepanze tra la frequenza di decadimento dei  $B^0$  e dei  $\bar{B}^0$  nei canali  $b \rightarrow s$  e  $b \rightarrow d$ , come ad esempio i decadimenti  $B \rightarrow \phi K^0$  e  $B \rightarrow \eta' K^0$ , dove ci si aspetta di vedere una violazione di  $CP$  dipendente dal tempo, che potrebbe contribuire all'asimmetria osservata nell'Universo.

**Bosone di Higgs** Alcuni modelli di nuova fisica includono dei bosoni di Higgs carichi, oltre a quello neutro già osservato. Una verifica indiretta della effettiva esistenza di questi Higgs carichi si può fare osservando le transizioni di sapore nel leptone  $\tau$ , in particolare nei canali di decadimento  $B \rightarrow \tau \nu$  oppure  $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ . Queste ricerche sono particolarmente promettenti in quanto delle deviazioni dal Modello Standard di  $2\sigma - 3\sigma$  sono già state osservate[2], Belle II potrebbe quindi confermare definitivamente queste osservazioni.

**FCNC** Una categoria di processi sensibili alla nuova fisica, è quella dei Flavour-Changing-Neutral-Current (FCNC). Questi fenomeni sono soppressi all'interno del Modello Standard, e possono dare evidenze di NP. Oltre all'interesse nei quark nel settore down, di particolare interesse all'interno di questi fenomeni è il quark  $c$ : il quark  $c$  è infatti l'unico quark del settore up in grado di dare qualche informazione rilevante da questo punto di vista (il quark top decade troppo velocemente, inoltre la sua massa è troppo alta per essere prodotto a Belle II).

**LFV** Lepton-Flavour-Violation. Belle II è in grado di produrre un gran numero di leptoni  $\tau$ , che permetteranno la ricerca di violazione del sapore leptonic, attraverso un decadimento come ad esempio  $\tau \rightarrow \mu \gamma$ . Al momento il limite

è  $\text{BR}(\tau \rightarrow \gamma\mu) < 4.4 \times 10^{-8}$ [3]. Belle II, nell'arco della sua presa dati, potrà osservare e distinguere questi eventi con una sensibilità migliore di  $10^{-8}$ .

### Ulteriori campi di ricerca

Belle II, può contribuire anche in campi della ricerca che non sono strettamente correlati alla fisica del sapore. Alcuni fenomeni di fisica fondamentale che non hanno ancora trovato una spiegazione soddisfacente infatti, possono beneficiare dell'ambiente di osservazione estremamente pulito tipico di Belle II. In particolare i settori in cui Belle II si propone di migliorare le conoscenze attuali sono:

**Materia oscura** Belle II è pensato per essere particolarmente preciso nel misurare le energie mancanti dai decadimenti osservati. Tutto ciò che è "nascosto" dovrebbe quindi poter essere notato, se è all'interno dei valori di energia in cui Belle II è sensibile. Inoltre il nuovo sistema di trigger di Belle II è in grado di attivarsi anche al passaggio di un singolo fotone, permettendo quindi di verificare la possibile esistenza di particelle particolarmente difficili da osservare, come ad esempio gli assioni.

**QCD** Lo studio dei quarkoni come il charmonio e il bottomonio è considerato un argomento di grande importanza a Belle II. Grazie agli studi fatti dalle precedenti B-factories e dagli acceleratori adronici, si è capito che questi particolari mesoni, sono di grande interesse per la comprensione della cromodinamica quantistica. La capacità di Belle II di identificare precisamente particelle sia cariche che neutre e la sua copertura quasi totale dell'angolo solido intorno al punto di interazione, lo rende particolarmente indicato per questo genere di ricerche.

Oltre a questi aspetti di ricerca di nuova fisica, Belle II si pone anche l'obiettivo di aumentare la precisione nella misura di moltissimi valori che hanno contribuito alle numerose conferme del Modello Standard.

## 1.2 Interazione dei Fotoni con la Materia

In questa sezione introdurrò i concetti teorici alla base dell'analisi discussa nel capitolo 3. Essendo l'analisi basata sulla ricostruzione dei vertici in cui vengono prodotte coppie elettrone-positrone, parlerò essenzialmente dell'interazione dei fotoni con la materia. Nella prima parte introdurrò brevemente l'effetto fotoelettrico e lo scattering Compton, che mi serviranno per introdurre il fenomeno di produzione di coppie da parte di fotoni ad alta energia. Come vedremo, quest'ultimo è infatti l'unico fenomeno di interazione radiazione-materia di reale interesse per questa tesi, essendo l'unico utilizzato esplicitamente nell'analisi del capitolo 3.

### Effetto fotoelettrico

Quando un fotone a bassa energia (con energie minori di qualche centinaio di keV) interagisce con un materiale, gli elettroni degli atomi che lo compongono possono assorbirlo e, se l'energia del fotone è sufficiente, l'elettrone può vincere la forza di legame ed essere quindi emesso, dando vita all'effetto fotoelettrico  $\gamma + \text{atom} \rightarrow \text{atom}^+ + e^-$ . L'energia dell'elettrone emesso è data da  $E_e = h\nu - h\nu_0$ , dove  $h\nu_0$  è l'energia di legame dell'elettrone mentre  $h\nu$  è l'energia del fotone incidente. Tuttavia, la sezione d'urto dell'effetto fotoelettrico diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia del fotone incidente e già ad energie superiori ai 500 keV diventa trascurabile. Rimanendo in questo ordine di energie, una formula approssimata che può essere utilizzata per calcolare la  $\sigma_{pe}$  per energie maggiori dell'energia di ionizzazione dell'atomo, ma minori di  $m_e c^2$ , è la seguente:

$$\sigma_{pe} \simeq 4\alpha^2 \sqrt{2} Z^5 \sigma_{Th} \left( \frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{7/2}$$

dove  $\sigma_{Th} = 8\pi r_e^2/3 = 6.65 \cdot 10^{-25} \text{cm}^2$  è la cross-section totale dello scattering Thomson, ovvero per i processi elastici con elettroni liberi  $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$  con energie del fotone vicine allo zero, in cui si può quindi trascurare il momento dell'elettrone dopo l'urto. Nella formula compaiono:  $r_e$  che è il raggio classico dell'elettrone e  $\alpha = 1/137$  la costante di struttura fine, infine  $Z$  è il numero atomico del materiale con cui il fotone interagisce [4].

### Scattering Compton

Aumentando l'energia, ma rimanendo sotto la soglia di produzione di coppie  $e^+e^-$ , l'interazione più probabile diventa lo scattering Compton. Lo scattering Compton è una collisione elastica di un fotone con un elettrone  $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$ . Se il fotone incidente ha un'energia molto superiore all'energia di legame dell'elettrone, quest'ultimo può essere considerato come libero. Per ricavare la cross-section totale dello scattering Compton si può partire dalla formula di Klein-Nishina:

$$\frac{d\sigma_C}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \Gamma(1 - \cos\theta)]^2} \left( 1 + \cos^2\theta + \frac{\Gamma^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \Gamma(1 - \cos\theta)} \right)$$

Dove  $\Gamma = h\nu/m_e c^2$ , in cui  $h\nu$  è ancora l'energia del fotone incidente, così come  $r_e$  è il raggio classico dell'elettrone, infine  $\theta$  è l'angolo di scattering.

Integrando la formula di Klein-Nishina su tutto l'angolo solido abbiamo la sezione d'urto totale dello scattering Compton:

$$\sigma_C = 2\pi r_e^2 \left[ \frac{1 + \Gamma}{\Gamma^2} \left( \frac{2(1 + \Gamma)}{1 + 2\Gamma} - \frac{1}{\Gamma} \ln(1 + 2\Gamma) \right) + \frac{1}{2\Gamma} \ln(1 + 2\Gamma) - \frac{1 + 3\Gamma}{(1 + 2\Gamma)^2} \right]$$

Dove per  $\Gamma \ll 1$  si torna alla sezione d'urto dello scattering Thomson citata nella sottosezione sull'effetto fotoelettrico [6].

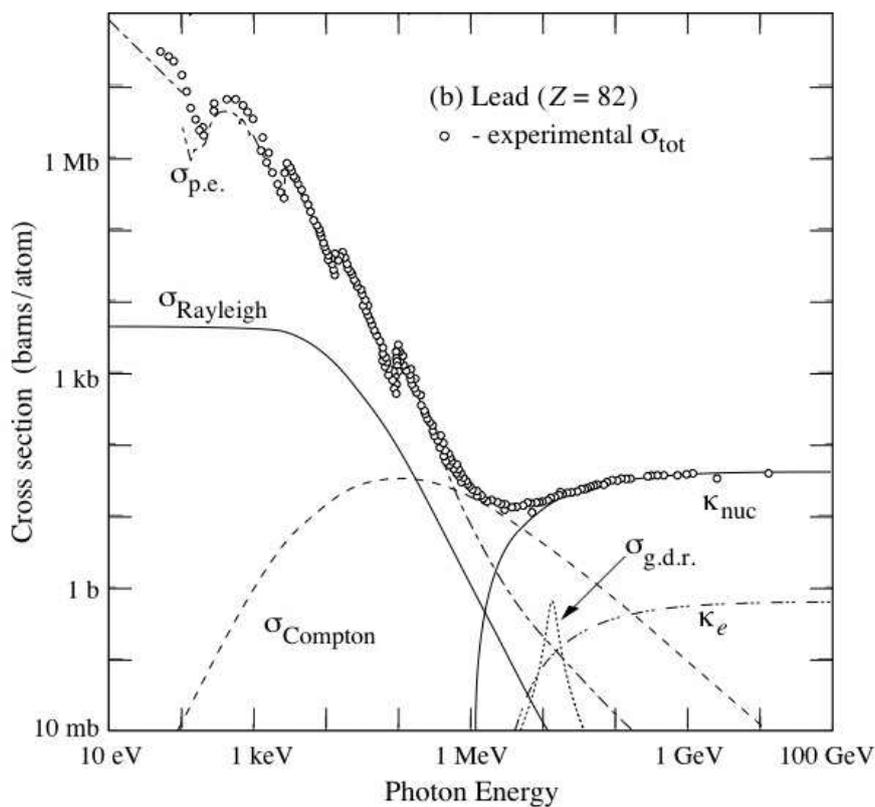


Figura 1.2: Sezione d'urto dell'interazione dei fotoni con il piombo. Nel caso del piombo, per energie comprese tra  $\sim 500$  keV e  $\sim 5$  MeV, l'interazione piú probabile è lo scattering Compton, mentre al di sotto è dominante l'effetto fotoelettrico. All'aumentare dell'energia invece, la produzione di coppie diventa il processo dominante [5].

Quando l'energia dei fotoni supera i 5-10 MeV, la produzione di coppie diventa il fenomeno predominante e verrà trattata a parte nella prossima sezione dedicata.

### 1.2.1 Produzione di coppie

In questa sezione descriverò il fenomeno della produzione di coppie da parte di fotoni ad alta energia e della sua sezione d'urto. Tuttavia, un calcolo generale per la sezione d'urto nel caso della produzione di coppie non è d'interesse per questa tesi, oltre che molto complicato. Nella seconda parte mi soffermerò sulla formula specifica della cross-section che utilizzerò nel capitolo dedicato all'analisi del material budget di VXD.

Il fenomeno della produzione di coppia da parte di un fotone consiste nella conversione di un fotone in una coppia  $e^+e^-$ , attraverso l'interazione elettromagnetica con un altro "oggetto", che solitamente è il nucleo di un atomo,  $\gamma + Z \rightarrow e^+ + e^- + Z$ . Il diagramma di Feynman che descrive la trasformazione è mostrato in fig. 1.3

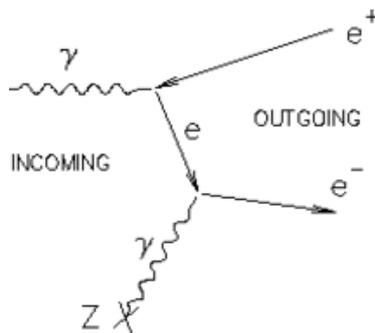


Figura 1.3: Diagramma di Feynman del processo di produzione di coppie.

Nella mia tesi il processo di produzione di coppie è alla base dell'analisi discussa al capitolo 3, in cui confronto il material budget del rivelatore VXD tra Monte Carlo e dei dati. Questo confronto viene fatto in termini di lunghezza di radiazione, che come definizione utilizza la perdita di energia di elettroni attraverso radiazione Bremsstrahlung o la produzione di coppie  $e^+e^-$  da parte di un fotone energetico. In particolare per la produzione di coppia la definizione di lunghezza di radiazione  $X_0$  corrisponde ai 7/9 del cammino libero medio di un fotone ad alta energia che converte in una coppia  $e^+e^-$  all'interno del materiale.

Il primo aspetto da tenere in considerazione è l'energia di soglia  $E_{\gamma S}$  necessaria ad un fotone per creare una coppia  $e^+e^-$ :

$$E_{\gamma S} = 2 \left( m_e + \frac{m_e^2}{m_r} \right)$$

dove  $m_r$  è la massa della particella bersaglio. La quantità di energia richiesta quindi varia in base alla massa della particella bersaglio, nel mio caso il materiale considerato con cui il fotone interagirà nella produzione di coppie  $e^+e^-$  è stato

semplificato in carbonio e silicio. Questi elementi hanno numero atomico rispettivamente di  $Z_C = 6$  e  $Z_{Si} = 14$ . Come si vedrà nel capitolo 3, le selezioni fatte in energia, sono molto al di sopra dell'energia di soglia necessaria alla produzione di coppie  $e^+e^-$ .

Nel processo di formazione di coppie è conveniente dividere due differenti casi, un primo in cui l'impulso della particella bersaglio dopo l'urto è trascurabile rispetto alla sua energia totale, mentre un secondo in cui l'energia del fotone incidente è paragonabile alla massa della particella bersaglio.

La  $\sigma_{pp}$  del processo di produzione di coppia ha una forma estremamente complicata e non è nell'interesse di questa tesi approfondire il calcolo di essa. Tuttavia, ritengo utile spiegare il ragionamento dietro la scelta della formula utilizzata nel capitolo 3. Per la produzione di coppia esistono infatti numerose approssimazioni possibili che permettono di ricavare delle formule semplificate per la sezione d'urto in base al caso specifico in esame. Nella sottosezione seguente spiegherò le approssimazioni utilizzate e introdurrò la formula corrispondente.

### cross-section $e^+e^-$ di interesse per questa tesi

Ci poniamo in una situazione in cui possiamo utilizzare l'approssimazione di Born, ovvero il caso in cui  $\alpha Z/\beta_+, \beta_- \ll 1$ , dove  $\beta_+, \beta_-$  sono, rispettivamente, il rapporto tra la velocità del positrone o dell'elettrone prodotti e la velocità della luce [7]. Infatti, l'energia dei fotoni verrà selezionata sopra ai 100 MeV, possiamo quindi considerare  $\beta_+, \beta_- \sim 1$ , inoltre, ricordando che  $\alpha = 1/137$  e che  $Z_C = 6$  e  $Z_{Si} = 14$ , possiamo considerarci all'interno dell'approssimazione. La seconda approssimazione è quella di considerare trascurabile il momento del nucleo bersaglio dopo l'urto. Partendo da queste approssimazioni e rimanendo nell'ambito di energie ultra-relativistiche  $E_+, E_-, E_\gamma \gg m_e c^2$ , la formula della cross-section, dove l'elettrone riceve una frazione dell'energia del fotone  $x = E_-/E_\gamma$ , è [6]:

$$\frac{d\sigma_{pp}}{dx} = \alpha r_e^2 \left\{ \left( \frac{4}{3}x(x-1) + 1 \right) \left[ Z^2(\phi_1(\eta) - \frac{4}{3}\ln Z - 4f(Z)) + Z(\psi_1(\eta) - \frac{8}{3}\ln Z) \right] + \frac{2}{3}x(1-x)[(Z^2(\phi_1(\eta) - \phi_2(\eta)) + Z(\psi_1(\eta) - \psi_2(\eta)))] \right\}$$

in cui  $f(Z)$  è la correzione di Coulomb, data dalla seguente espansione in serie di  $a = \alpha Z$ :

$$f(Z) = a^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n^2 + a^2)},$$

mentre  $\phi_1(\eta), \phi_2(\eta)$  e  $\psi_1(\eta), \psi_2(\eta)$  sono le funzioni di screening, rispettivamente per lo scattering del nucleo e dei singoli elettroni, dove  $\eta$  è il parametro di screening:

$$\eta = \frac{137m_e c^2 E_\gamma}{2E_+ E_- Z^{1/3}}.$$

A questo punto introduciamo un'ulteriore approssimazione, quella in cui l'atomo bersaglio può essere visto come completamente schermato, ovvero  $\alpha Z^{1/3} E_\gamma \gg m_e c^2$ . Nel nostro caso infatti  $Z_C^{1/3} = 1.82$  mentre  $Z_{Si}^{1/3} = 2.41$  significa che possiamo utilizzare questa approssimazione per energie del fotone incidente superiori a  $\sim 330$  MeV. Nel caso completamente schermato  $\eta \rightarrow 0$  e le funzioni di screening diventano:

$$\phi_1(0) - \phi_2(0) = \psi_1(0) - \psi_2(0) = \frac{2}{3}$$

Con questa ulteriore approssimazione, la formula della cross-section si semplifica in:

$$\frac{d\sigma_{pp}}{dx} = 4\alpha r_e^2 \left\{ \left( \frac{4}{3}x(x-1) + 1 \right) [Z^2(L_{rad} - f(Z)) + ZL'_{rad}] + \frac{1}{9}x(1-x)(Z^2 + Z) \right\}$$

dove  $L_{rad} = 1/4\phi_1(0) - 1/3\ln Z$  e  $L'_{rad} = 1/4\psi_1(0) - 2\ln Z$ .

Integrando questa formula otteniamo la cross-section totale:

$$\sigma_{pp} = 4\alpha r_e^2 \frac{7}{9} \left\{ [Z^2(L_{rad} - f(Z)) + ZL'_{rad}] + \frac{1}{42}(Z^2 + Z) \right\}$$

che come si può vedere non dipende dall'energia del fotone, rimanendo con energie superiori a 330 MeV.

Infine, bisogna anche tenere in considerazione che nel sistema di riferimento del laboratorio l'energia tra positroni ed elettroni non è equamente distribuita ( $E_+ \neq E_-$ ). In questi casi, per energie  $E_-/E_\gamma$  vicine a 0 o ad 1 la cross-section non è costante in  $x = E_-/E_\gamma$ , come mostrato nella Fig. 1.4.

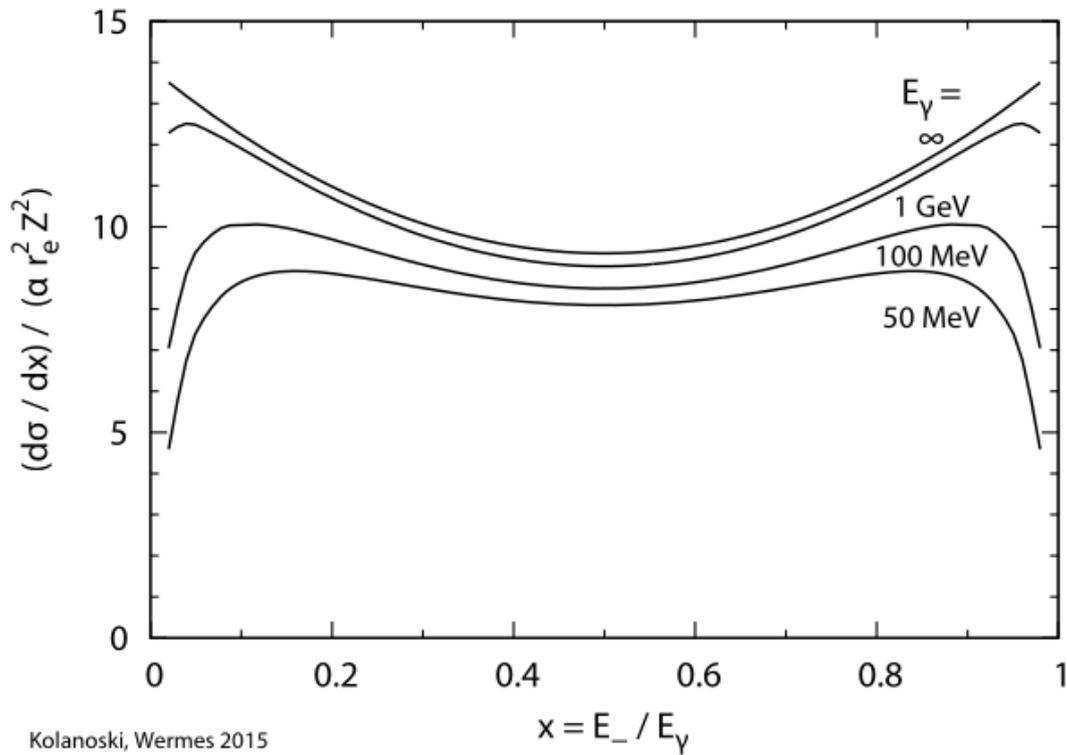


Figura 1.4: Cross-section differenziale della produzione di coppie, in unità  $\alpha Z^2 r_0^2 / E_\gamma$ , in funzione dell'energia normalizzata dell'elettrone  $x = E_- / E_\gamma$ . Le curve a 50 MeV, 100 MeV e 1 GeV, sono fatte assumendo uno screening non completo. La curva asintotica ( $E_\gamma = \infty$ ) è fatta assumendo uno screening completo [6].

# Capitolo 2

## SuperKEKB e Belle II

In questo capitolo farò una panoramica sull'esperimento Belle II, partendo dai motivi che hanno portato alla sua costruzione dati dai suoi predecessori, le B-factories di BaBar e Belle. Dopodiché spiegherò come è fatto l'esperimento ed in particolare il suo rivelatore, soffermandomi sul rivelatore di vertice VXD, il sottorivelatore su cui si basa lo studio proposto in questa tesi. In questa sezione introdurrò anche un possibile upgrade di VXD, il rivelatore di vertice VTX. Infine, per completare la spiegazione del funzionamento dell'esperimento, parlerò del software di analisi e simulazione utilizzato dalla collaborazione: BASF2.

### 2.1 B-Factories

La scelta di costruire un acceleratore pensato per lavorare intorno all'energia di produzione della  $\Upsilon(4S)$  si basa sugli studi effettuati dal Bigi, Sanda e Carter all'inizio degli anni '80 [8][9]. Utilizzando i pochi dati raccolti dall'esperimento CLEO a CESR (Cornell Electron Storage Ring), conclusero che una violazione di  $CP$  poteva essere osservata nel decadimento di mesoni  $B$  neutri in un autostato di  $CP$ , ad esempio  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ . Alla fine degli anni '80 quindi, il fermento sulla possibilità di creare degli acceleratori appositamente pensati per la produzione di mesoni  $B$ , aveva permesso di pubblicare le prime proposte di esperimenti [10]. Da queste proposte, alla fine del millennio, nacquero le prime generazioni di B-factories.

L'aspetto fondamentale delle B-Factories è che i loro acceleratori devono essere asimmetrici. Ovvero sono formati da due anelli al cui interno girano fasci ( $e^+e^-$ ) con diversa energia uno dall'altro, questo rende possibile tutte le misure dipendenti dal tempo, come anche la violazione di  $CP$ . L'energia dei fasci è calibrata per la produzione della risonanza  $\Upsilon(4S)$ , che decade in più del 96% dei casi in una coppia  $B\bar{B}$ , di cui la metà delle volte circa in  $B^+B^-$  e l'altra metà in  $B^0\bar{B}^0$ . Un rivelatore simmetrico produrrebbe una  $\Upsilon(4S)$  ferma rispetto al sistema di riferimento del laboratorio, che decadrebbe quindi in un sistema  $B\bar{B}$  con un  $\beta^*$  praticamente nullo. La massa della  $\Upsilon(4S)$  è infatti di 10.58 GeV, mentre la massa di un mesone  $B^0$  è 5.28 GeV, il suo decadimento da ferma quindi creerebbe un mesone  $B^0$  con un impulso di soli 325 MeV

e un boost di  $\beta\gamma = 0.06$ . Tenendo conto che il tempo di vita media del  $B^0$  è  $1.52 \times 10^{-12}$  s, la distanza percorsa in media prima di decadere sarebbe dell'ordine di  $\beta\gamma c\tau = 0.06 \cdot 3 \times 10^8 \cdot 1.52 \times 10^{-12} = 27\mu\text{m}$ , una quantità al di sotto delle capacità di misura dei rivelatori.

Per ovviare a questo problema si utilizza un acceleratore asimmetrico, dando così un boost alla  $\Upsilon(4S)$  che a sua volta viene trasferito ai mesoni  $B$ , rendendo così possibile la misura della distanza di decadimento tra i due mesoni  $B$ . In particolare per l'esperimento BaBar le energie dei fasci erano di 3.1 GeV per i positroni e 9 GeV per gli elettroni, mentre per l'esperimento Belle di 3.5 GeV per i positroni e 8 GeV per gli elettroni. Con queste energie i boost delle particelle  $\Upsilon(4S)$  prodotte, diventano rispettivamente  $\beta\gamma = 0.56$  per BaBar e  $\beta\gamma = 0.43$  per Belle, che si traducono in una separazione spaziale media dei due vertici di decadimento di  $260\mu\text{m}$  e  $200\mu\text{m}$  rispettivamente, una quantità misurabile dai rivelatori di vertice al silicio.

Una seconda caratteristica fondamentale per una B-factory è quella di avere un alto valore di luminosità. Essendo esperimenti innanzi tutto pensati per studiare la violazione di  $CP$ , il canale di decadimento del mesone  $B^0$  più interessante è quindi quello in  $B^0 \rightarrow J/\psi$ , che però ha una branching fraction di solo 0.04%. Inoltre il canale di decadimento che ci interessa per la  $J/\psi$  è  $J/\psi \rightarrow l^+l^-$  che anche lui ha una branching fraction del 12%. Il tutto si traduce quindi nella necessità di avere un grandissimo quantitativo di mesoni  $B$  di partenza e quindi in un'alta luminosità. In particolare PEP-II (l'acceleratore di BaBar a SLAC) ha raggiunto il livello di luminosità istantanea di  $\mathcal{L} = 1.2 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , mentre KEKB (l'acceleratore di Belle a KEK) è riuscito a raggiungere una luminosità istantanea di  $\mathcal{L} = 1.7 \times 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  [3].

Infine il rivelatore di una B-factory deve poter essere in grado di riconoscere quali particelle si sono formate all'interno del suo rivelatore e deve essere in grado di tracciare con un alto livello di precisione il vertice di produzione delle particelle cariche. Queste capacità di rivelazione sono infatti la base di una misura della violazione di  $CP$  e delle altre misure di fisica delle B-factories. Una B-factory necessita quindi di un rivelatore di particelle general purpose. Per questo motivo quindi, una B-factory è composta da un acceleratore  $e^+e^-$ , che crea eventi  $B^0 - \bar{B}^0$  in uno stato ortogonale ("entanglement"), permettendo così di ricavare le informazioni necessarie per gli studi sulla violazione di  $CP$ .

## 2.2 SuperKEKB

SuperKEKB è l'acceleratore di Belle II, l'aggiornamento di KEKB, nel centro di ricerca KEK a Tsukuba (Giappone). Essendo stato progettato con una luminosità nominale di un fattore circa quaranta volte superiore rispetto a quella di KEKB, sono stati necessari tutta una serie di nuovi accorgimenti. La caratteristica principale che rende possibile questo aumento di luminosità è la dimensione del fascio nel punto di interazione. Utilizzando il *nanobeam scheme* proposto nel CDR di SuperB [11], si concentra la dimensione del fascio di venti volte, passando

da circa  $1\mu\text{m}$  a circa  $50\text{ nm}$ , oltre che ad un aumento della corrente di un fattore 2. SuperKEKB inoltre fa collidere i fasci nel punto di interazione con un angolo di  $83\text{ mrad}$ , rispetto alle  $22\text{ mrad}$  di KEKB. Infine, per poter aumentare i livelli di luminosità istantanea, la asimmetria dei fasci di superKEKB è stata ridotta ad un'energia di  $7\text{ GeV}$  e  $4\text{ GeV}$ , rispettivamente per elettroni e positroni, che si traduce in una diminuzione della distanza media di decadimento dei mesoni B di  $130\mu\text{m}$ . Tuttavia questa diminuzione non rappresenta un problema nella risoluzione dei vertici, grazie al rivelatore di vertice VXD di cui parlerò nella sezione dedicata.

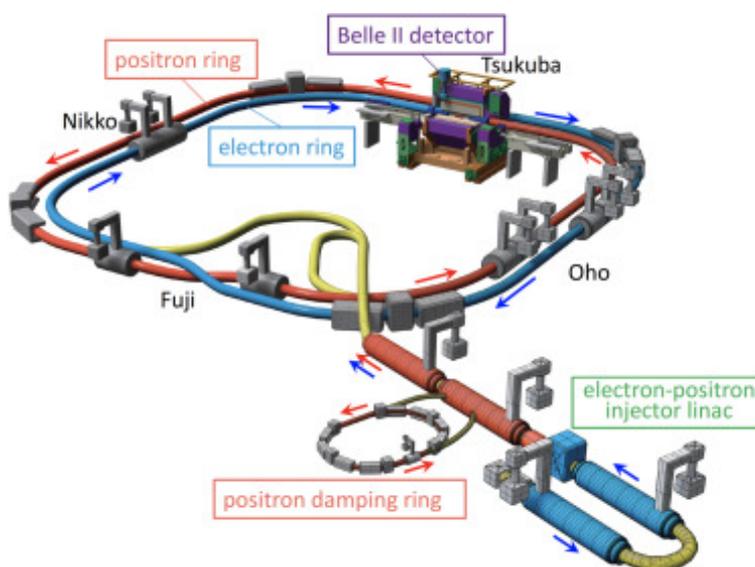


Figura 2.1: Disegno schematico di SuperKEKB.

Concentrare il fascio di elettroni e positroni nella regione di interazione, significa diminuire i  $\beta_x^*$  e  $\beta_y^*$ . In SuperKEKB sono stati ridotti di un fattore 10 in x e di un fattore 20 in y ( $\beta_x^* = 30\text{mm}$ ,  $\beta_y^* = 300\mu\text{m}$ ), rispetto a KEKB. Una riduzione di questo livello, si traduce in una maggiore instabilità dovuta allo scattering Touschek e quindi in una degradazione del fascio più rapida. Ci si aspetta quindi un tempo di vita medio breve del fascio di  $\sim 360\text{ s}$ , questo ha richiesto quindi anche un upgrade dell'injection gun [12]. Alcuni dei parametri principali di SuperKEKB sono stati inseriti nella tab. 2.1, per il confronto con quelli di KEKB.

### 2.2.1 Background

L'aumento di luminosità di SuperKEKB, ha portato inevitabilmente ad un aumento dei fondi di macchina. In questa sezione farò un elenco delle principali sorgenti di background.

		KEKB	SuperKEKB
Energia fasci	$E$	3.5 - 8.0 GeV	4.0 - 7.007 GeV
Funzione beta nell'IP	$\beta_x^*/\beta_y^*$	1200/5.9 mm	32/0.27 - 25/0.30 mm
Dimensione fascio orizz.	$\sigma_x^*$	147 - 170 $\mu\text{m}$	10.1 - 10.7 $\mu\text{m}$
Dimensione fascio vert.	$\sigma_y^*$	940 nm	48 - 62 nm
Lunghezza fascio	$\sigma_z^*$	$\sim 7$ mm	6.0 - 5.0 mm
Corrente del fascio	$I$	1.64 - 1.19 A	3.60 - 2.60 A
Particelle per bunch	$N$	$6.47 - 4.72 \times 10^{10}$	$9.04 - 6.53 \times 10^{10}$
Energia persa per giro	$U_0$	1.64 - 3.48 MeV	1.87 - 2.45 MeV
RF frequency	$f_{RF}$	508.8 MHz	508.8 MHz
Luminosità (nominale)	$\mathcal{L}$	$2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Tabella 2.1: Confronto dei parametri di progettazione tra KEKB e SuperKEKB. In alcuni casi i valori sono due, come ad esempio  $\sigma_z^* = 147 - 170 \mu\text{m}$ , il primo corrisponde sempre a LER ed il secondo ad HER (Low Energy Ring - High Energy Ring). Quando i valori sono singoli, significa che sono uguali tra LER ed HER [12].

### Touschek scattering

La prima sorgente di background è dovuta al cosiddetto "Touschek scattering", un processo che avviene all'interno dei singoli bunch ed è dovuto alla repulsione coulombiana tra due particelle. Interagendo, le particelle che compongono il bunch si ritrovano ad avere un'energia differente rispetto all'energia nominale del fascio.

In SuperKEKB l'effetto Touschek è particolarmente importante, avendo un fascio estremamente ridotto in dimensione nel punto di interazione. Il rate è proporzionale al numero di bunch, al quadrato della corrente e inversamente proporzionale al cubo dell'energia e alla dimensione trasversa del fascio. Una semplice riscalatura fatta tenendo conto della riduzione delle dimensioni del fascio rispetto a KEKB, ci porta a stimare un aumento di 20 volte dell'effetto Touschek. Le particelle interagenti quindi hanno la possibilità di uscire dal bunch e di andare a scontrarsi contro la parete interna della beampipe e di conseguenza propagarsi a cascata anche all'esterno.

Per ovviare a questo problema, in SuperKEKB sono stati inseriti tutta una serie di collimatori verticali ed orizzontali così da evitare che le particelle uscendo dal fascio possano andare ad interagire all'interno del rivelatore.

### Beam-gas scattering

Una seconda sorgente di background è dovuta al "beam-gas scattering". Lo scattering che le particelle del fascio possono avere con le molecole di gas residuo rimaste all'interno della beampipe, dovuto all'impossibilità di avere un vuoto assoluto. Questo può avvenire in due modi differenti: attraverso uno scattering Coulomb, che devia quindi la direzione della particella, oppure perdendo energia per Bremsstrahlung. La frequenza con cui queste interazioni avvengono è quindi

proporzionale alla corrente del fascio e al livello di vuoto all'interno della beam-pipe. La corrente è circa il doppio rispetto a KEKB, mentre il livello di vuoto simile, tuttavia bisogna tenere conto anche che il diametro della beam-pipe di SuperKEKB è 1 cm rispetto agli 1.5 cm di KEKB, che rende molto più probabile che una particella vada ad interagire con la parete del tubo. Anche in questo caso però i collimatori permettono di tenere sotto controllo questa sorgente di background.

### **Radiazione di sincrotrone**

Un'altra sorgente di background è la radiazione di sincrotrone emessa dal fascio. Questa è in misura maggiore proveniente dal fascio più energetico. Infatti, la potenza della radiazione di sincrotrone, è proporzionale al quadrato dell'energia del fascio (e al quadrato del campo magnetico). I fotoni creati dalla radiazione di sincrotrone hanno un range di energia tra 1 keV e 10 keV. Questa sorgente di background necessita di particolare attenzione, in quanto a causa di essa il rivelatore di vertice di Belle è stato danneggiato più volte. I fasci entranti di elettroni e di positroni sono più vicini all'asse dei quadrupoli rispetto a KEKB vicino alla regione di interazione. KEKB infatti, aveva un solo quadrupolo vicino all'IR, sia per gli  $e^+$  che per gli  $e^-$ . Al costo di un angolo di interazione maggiore, questo permette di ridurre significativamente la radiazione di sincrotrone nella zona di interazione.

### **Scattering radiativo Bhabha**

I fotoni prodotti nel processo di scattering Bhabha radiativo si propagano dall'asse del fascio e possono andare ad interagire con il materiale dei magneti dell'acceleratore, producendo così una grande quantità di raggi gamma a bassa energia e neutroni. Questa sorgente è la principale causa di background per le parti più esterne del rivelatore, in particolare i neutroni sono un problema per il KLM mentre i fotoni lo sono per la CDC e il TOP (rivelatori descritti nella sezione seguente). Essendo questo processo proporzionale alla luminosità, questa sorgente di background è circa 40 volte superiore rispetto a KEKB.

### **Processi a due fotoni**

Questo background viene creato dalle coppie elettrone-positrone a bassa energia, prodotte dal processo a due fotoni  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ . Queste coppie, prodotte solitamente a bassa energia, spiralizzando possono lasciare numerose hits nella parte interna del detector andando così a disturbare le ricostruzioni. Inoltre anche le particelle di partenza di questo processo se subiscono una deviazione sufficientemente importante o perdono abbastanza energia, possono finire all'interno del detector, come per lo scattering Bhabha.

## Injection background

Infine l'ultima sorgente da citare è quella che si crea nel momento in cui vengono iniettate nuove particelle in un bunch già esistente. Il bunch viene perturbato e per qualche millisecondo il livello di background aumenta notevolmente. Per ovviare a questo problema si usa un trigger di veto nel momento dell'iniezione, così da evitare la saturazione del rivelatore più interno a pixel [13].

## 2.3 Il rivelatore di Belle II

Rispetto al suo predecessore, il rivelatore di Belle II viene utilizzato con un acceleratore con una luminosità di 40 volte superiore, deve quindi essere in grado di processare una mole di dati più alta e deve essere in grado di resistere ad un background circa 20 volte superiore. Al momento tuttavia, i risultati di luminosità non stanno rispettando le previsioni. SuperKEKB si prefissava di raggiungere la stessa luminosità integrata di Belle (vedi fig. 2.2) nei primi 3 anni di utilizzo. La realtà al momento però non sta seguendo le aspettative. La luminosità integrata di Belle II è infatti circa un terzo rispetto a quella di Belle. Bisogna ricordare però, che stiamo comunque parlando dell'acceleratore con la luminosità di picco più alta al mondo e che, lavorando alla frontiera della tecnologia, non è facile fare previsioni accurate.

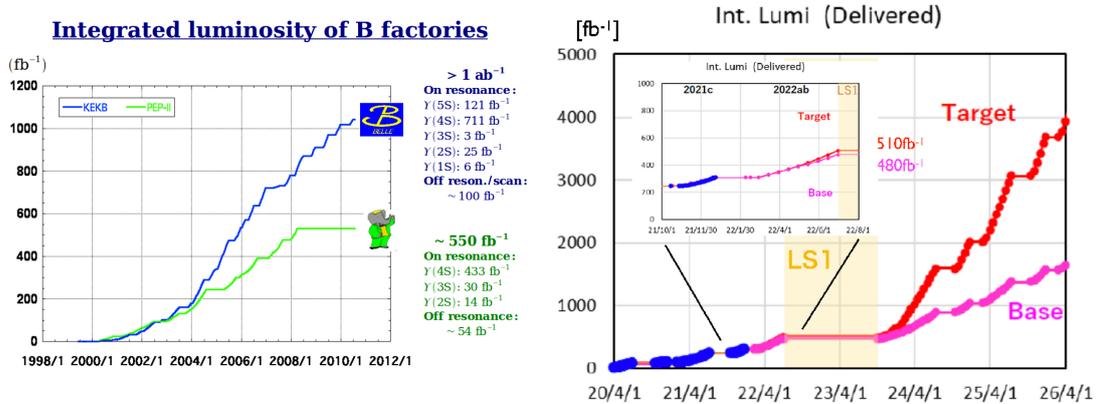


Figura 2.2: A sinistra la luminosità integrata dagli esperimenti Belle e BaBar [14]. A destra la luminosità integrata di Belle II fino ad oggi e le previsioni riviste con i dati raccolti fin'ora: la linea rossa corrisponde al target, tenendo conto dei dati odierni, la linea rosa è lo scenario peggiore [15].

Le principali specifiche di progetto che deve avere un rivelatore come Belle II sono:

- Un'alta risoluzione sui vertici di decadimento ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ), necessaria per tutte le misure dipendenti dal tempo.
- Un'alta risoluzione in impulso e in energia, necessaria a distinguere i candidati dal background.

- Un sistema di identificazione delle particelle efficiente, specialmente per kaoni e muoni, lungo tutto lo spettro in impulso dell'esperimento.
- Un'accettazione che permetta di coprire il massimo dell'angolo solido, tenendo conto della asimmetria dell'acceleratore, in modo da massimizzare la statistica.
- Un sistema di trigger veloce ed efficiente, visto l'aumento di luminosità portato da SuperKEKB.
- Infine (cosa di cui mi occuperò più nel dettaglio in questa tesi), un material budget il più basso possibile, così da avere una minore incertezza nel tracking, dovuta allo scattering multiplo delle particelle.

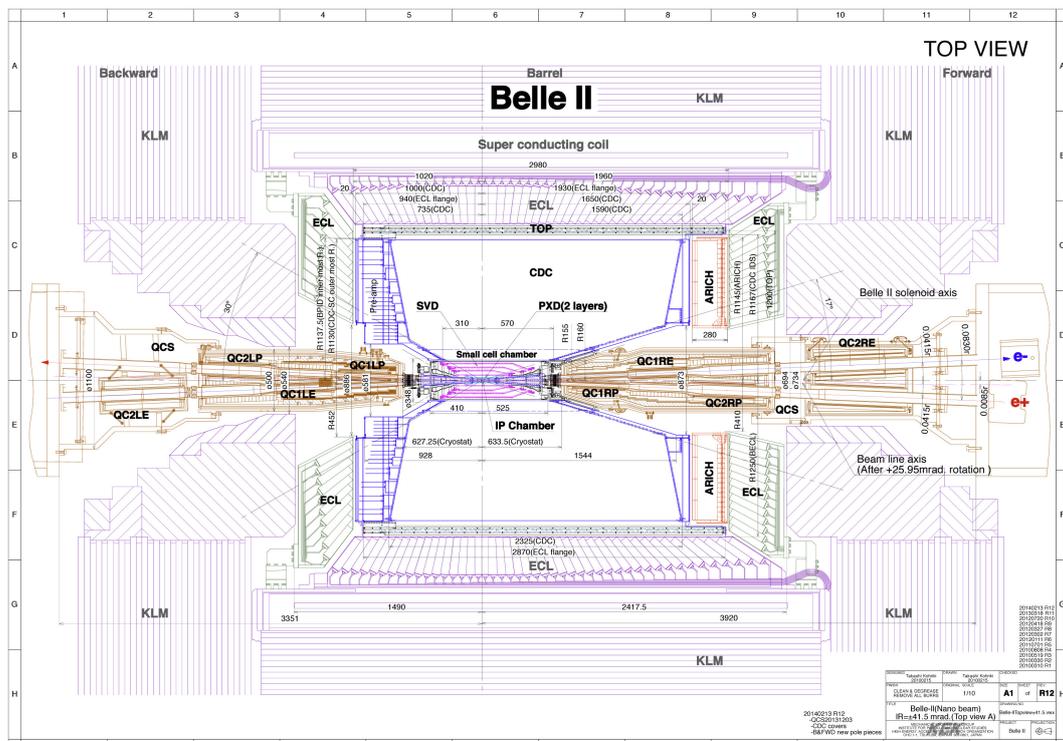


Figura 2.3: Messa in tavola del rivelatore di Belle II.

È stato quindi costruito il rivelatore "general purpose" mostrato in Fig. 2.3, composto da sottorivelatori, pensati ognuno per coprire specifiche caratteristiche. Per dare una panoramica migliore del rivelatore, elenco brevemente i sottorivelatori di cui è composto, partendo dal punto di interazione e andando verso l'esterno, dopodiché ne parlo più nel dettaglio nelle sottosezioni seguenti.

- VXD, il rivelatore di vertice, composto dal rivelatore a pixel PXD e dal rivelatore a strisce di silicio SVD. Nonostante sia il sottorivelatore più vicino al punto di interazione, ne parlerò per ultimo in una sezione dedicata, visto che la mia tesi si concentra proprio su di esso.

- CDC, Central Drift Chamber, la camera a fili dedicata alla tracciatura e alla misura della perdita di energia per ionizzazione delle particelle cariche. La CDC è inoltre uno dei rivelatori che fornisce le informazioni per il trigger di livello 1.
- TOP e ARICH, i due rivelatori Cherenkov necessari all'identificazione delle particelle (PID).
- ECL, il calorimetro elettromagnetico, utilizzato per misurare l'angolo e l'energia dei fotoni e degli elettroni.
- Dopo ECL troviamo il solenoide superconduttivo che crea un campo magnetico di 1.5 T, permettendo così la deviazione delle particelle cariche.
- KLM, utilizzato per identificare particelle penetranti con un tempo di vita lungo come i muoni e i  $K_L^0$  tramite RPC. KLM viene usato anche come ritorno del flusso magnetico del solenoide superconduttore.

### 2.3.1 Central Drift Chamber: CDC

La camera a fili di Belle II è composta da due cilindri in materiale composito (CFRP), così da limitare il più possibile il material budget. Il cilindro interno è spesso 0.4 mm mentre quello esterno 5 mm, i due cilindri hanno raggio rispettivamente di 160 mm e 1130 mm e lunghezza di 2300 mm, mentre i due dischi che chiudono la camera sono fatti di alluminio con uno spessore di 10 mm. La CDC, come il rivelatore di vertice, ha un'accettanza compresa tra gli angoli  $\theta = 17^\circ$  e  $\theta = 150^\circ$ , rispetto alla direzione del fascio più energetico.

L'interno della camera è riempito con un gas composto al 50% di elio e 50% di etano (He e  $C_2H_6$ ), lo stesso usato in Belle. I materiali che compongono i fili, sono stati mantenuti uguali a quelli di Belle: i fili che fanno da anodo sono di tungsteno placcato in oro di spessore  $30 \mu\text{m}$ , mentre i fili che fanno da catodo sono di alluminio con uno spessore di  $126 \mu\text{m}$ . La differenza sostanziale con Belle è la distanza che hanno tra di loro questi fili e quindi la dimensione delle celle di deriva. Mentre in Belle erano tutte di 10-18 mm, in Belle II negli 8 layers più interni sono di 6-8 mm, questa modifica è stata necessaria per poter gestire i più alti livelli di background prodotti da SuperKEKB.

La camera è composta complessivamente da 56 layers, di cui gli 8 layers più interni con dimensioni delle celle più piccole. Come mostrato in fig. 2.4 i restanti 48 layers sono raggruppati in 8 superlayers composti da 6 layers ognuno; i fili degli 8 superlayers sono direzionati alternativamente in modo assiale e stereoscopico rispetto alla direzione del fascio.

Essendo aumentato il background in SuperKEKB, anche l'elettronica di lettura di CDC è stata migliorata, in modo che fosse in grado di distinguere in maniera più efficiente tra segnale e background. Il tutto è stato collegato utilizzando la piastra posteriore della camera (con posteriore si intende la direzione

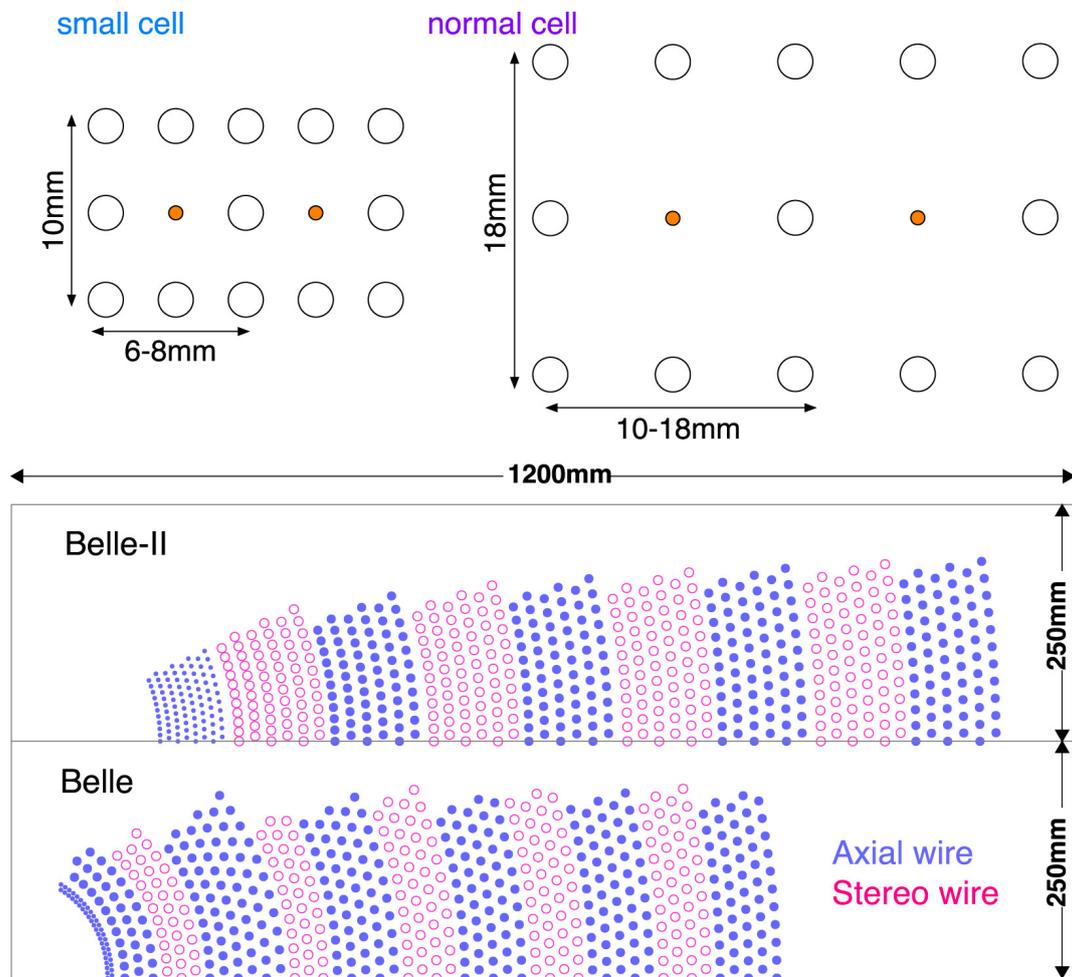


Figura 2.4: Nella parte alta della figura è mostrata la differenza tra le celle di dimensione normale - usate nella camera di Belle e nei layers esterni della camera di Belle II - e le celle di dimensioni ridotte usate negli 8 layers più interni di Belle II. Nella parte bassa della figura sono invece mostrati i layout delle camere di Belle II rispetto a Belle, i puntini blu corrispondono ai fili disposti assialmente, i cerchi rosa ai fili disposti stereoscopicamente [16].

”backward”, da cui provengono gli elettroni, mentre in avanti si intende la direzione ”forward”, da cui provengono i positroni, meno energetici). La piastra in avanti è invece stata utilizzata per alimentare ad alto voltaggio i fili della camera.

Grazie a queste caratteristiche la CDC è in grado di tracciare le particelle cariche e di misurarne l’impulso, oltre che ad identificarle mediante la misura della loro perdita di energia per ionizzazione. Inoltre la CDC viene utilizzata anche nel sistema di trigger; grazie alla velocità di elaborazione, è il primo sottorivelatore ad inviare il segnale di trigger, viene quindi usato per il trigger di livello 1.

### 2.3.2 Rivelatori Cherenkov: ARICH e TOP

Il rivelatore Cherenkov ha essenzialmente il compito di identificare le particelle attraverso i diversi coni di luce Cherenkov emessi al loro passaggio. È composto dal rivelatore TOP (Time-Of-Propagation) e dal rivelatore ARICH (Aerogel Ring Imaging Cherenkov).

Il Time-Of-Propagation Counter (TOP) è composto da 16 moduli, ognuno dei quali è composto da una barra di quarzo lunga 2.6 m, larga 0.45 m e alta 0.02 m, sul lato backward della barra è posto uno specchio sferico per ridurre l’errore cromatico e dall’altro lato un prisma di quarzo di 0.1 m, oltre il quale si trovano due file di sedici fotorivelatori (MCP-PMT) ognuna, in grado di misurare il tempo di volo dei fotoni con una precisione di 100 ps (vedi fig. 2.5).

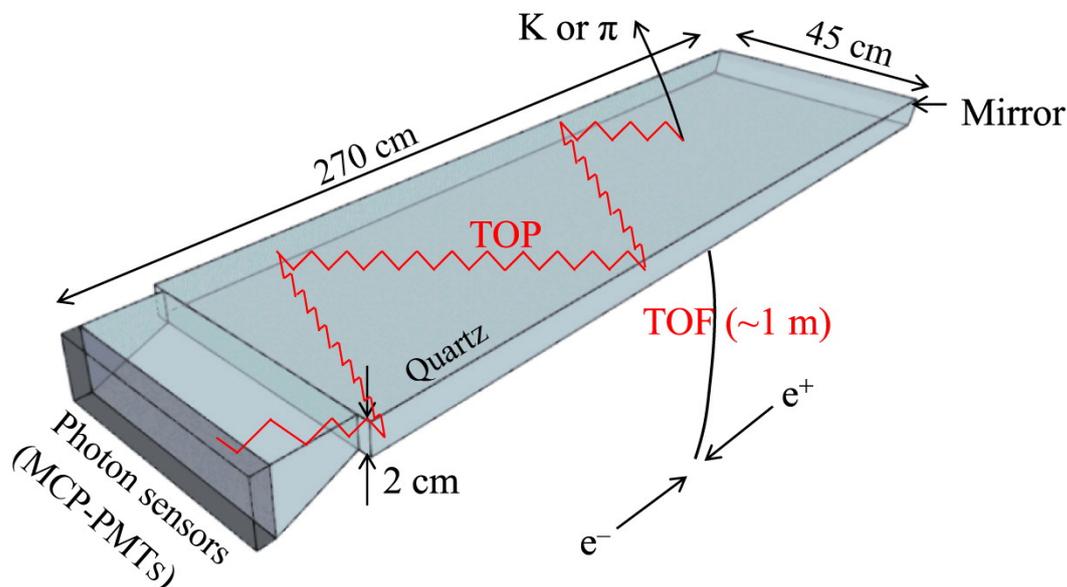


Figura 2.5: Singolo modulo del rivelatore TOP.

Il rivelatore TOP è in grado di distinguere con precisione i  $\pi$  dai  $K$  fino ad un impulso di  $\sim 3.5 \text{ GeV}/c$ . Le particelle al passaggio creano un cono di luce Cherenkov che si propaga nel modulo di quarzo fino al prisma dove viene rivelato dai MCP-PMT e quindi ricostruito con una precisione dell’ordine del mm.

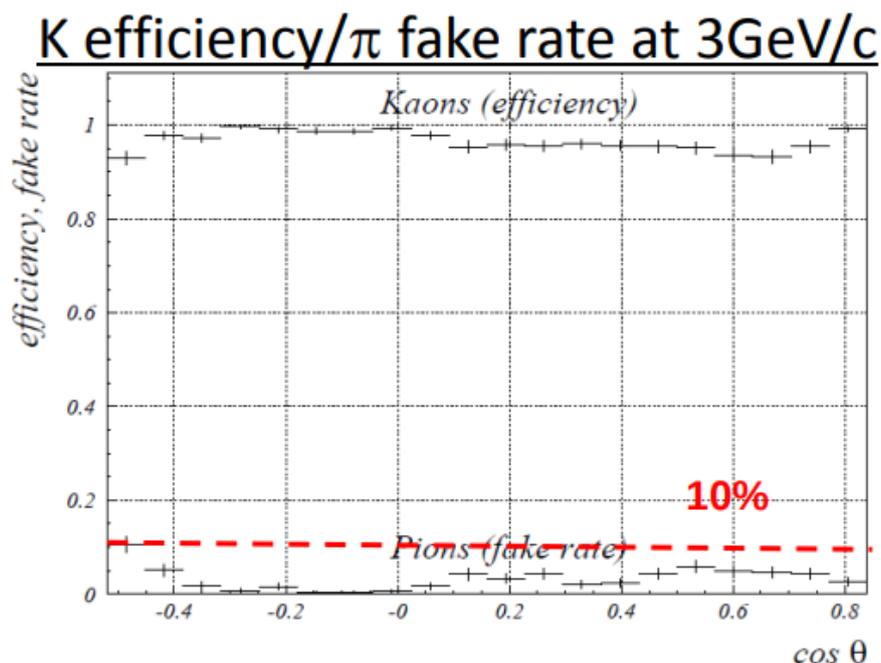


Figura 2.6: Efficienza di identificazione di TOP [17].

Il rivelatore ARICH invece è posto nella parte forward (in avanti) del rivelatore ed è composto da due dischi in aerogel spessi 2 cm, con differenti indici di rifrazione, come mostrato schematicamente in fig. 2.7 ( $n = 1.045$  per il primo e  $n = 1.055$  per il secondo). Questo permette di aumentare la risoluzione nella misura dell'angolo del cono Cherenkov, senza andare a diminuire l'intensità della luce. La regione di espansione del cono è di 20 cm, dopo la quale ci sono 540 HAPD (Hybrid Avalanche Photons Detector), disposti su 9 anelli concentrici. I fotorivelatori con tecnologia HAPD, hanno un tubo a vuoto con un campo elettrico di 8 kV che permette ai diodi a valanga (APD) - 144 diodi posti su una griglia 12x12 - di rivelare gli elettroni creati dai fotoni per effetto fotoelettrico.

Il rivelatore ARICH è in grado di aumentare la risoluzione della misura dell'angolo Cherenkov, aumentando così la capacità di distinguere i  $\pi$  dai  $K$  fino a 4 GeV/c, oltre che permettere di distinguere tra  $\pi$ ,  $\mu$  ed  $e$  con un impulso al di sotto di 1 GeV/c.

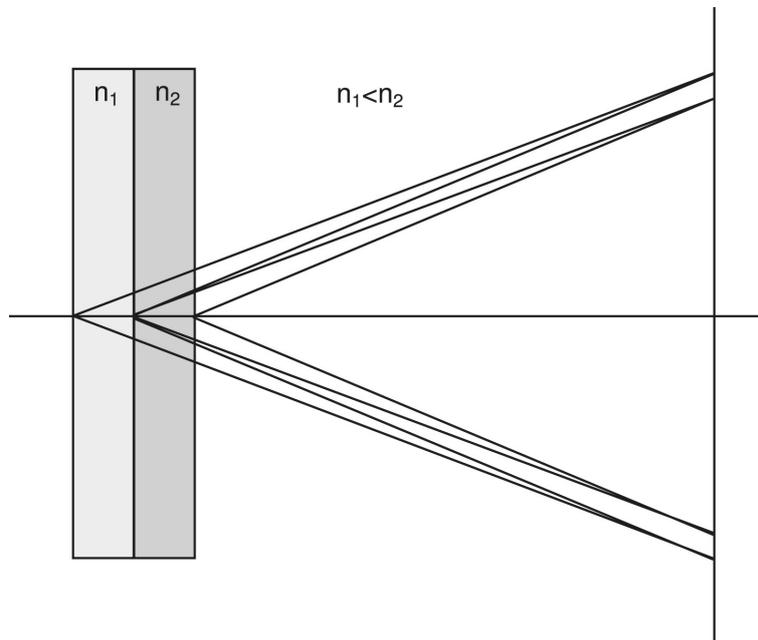


Figura 2.7: Principio di funzionamento del rivelatore Cherenkov ARICH. Il diametro interno dei dischi è di 0.87 m, mentre il diametro esterno di 2.28 m, creando così un angolo di accettazione compreso tra  $\theta = 14^\circ$  e  $\theta = 30^\circ$ .



Figura 2.8: Anello Cherenkov creato dal passaggio di un muone cosmico.

### 2.3.3 Electromagnetic Calorimeter: ECL

Il calorimetro elettromagnetico viene utilizzato per rivelare i fotoni e misurare la loro energia. In particolare ECL è in grado di misurare l'energia delle particelle con una risoluzione  $\sigma_E$ , che varia dal 4% a 100 MeV diminuendo fino a 1.8% ad 8 GeV. Il calorimetro elettromagnetico di Belle II è composto da cristalli di ioduro di cesio drogati al tallio CsI(Tl), sono gli stessi utilizzati nel predecessore Belle e sono disposti con simmetria assiale e a ventaglio lungo l'angolo polare  $\theta$  come mostrato in Fig. 2.9.

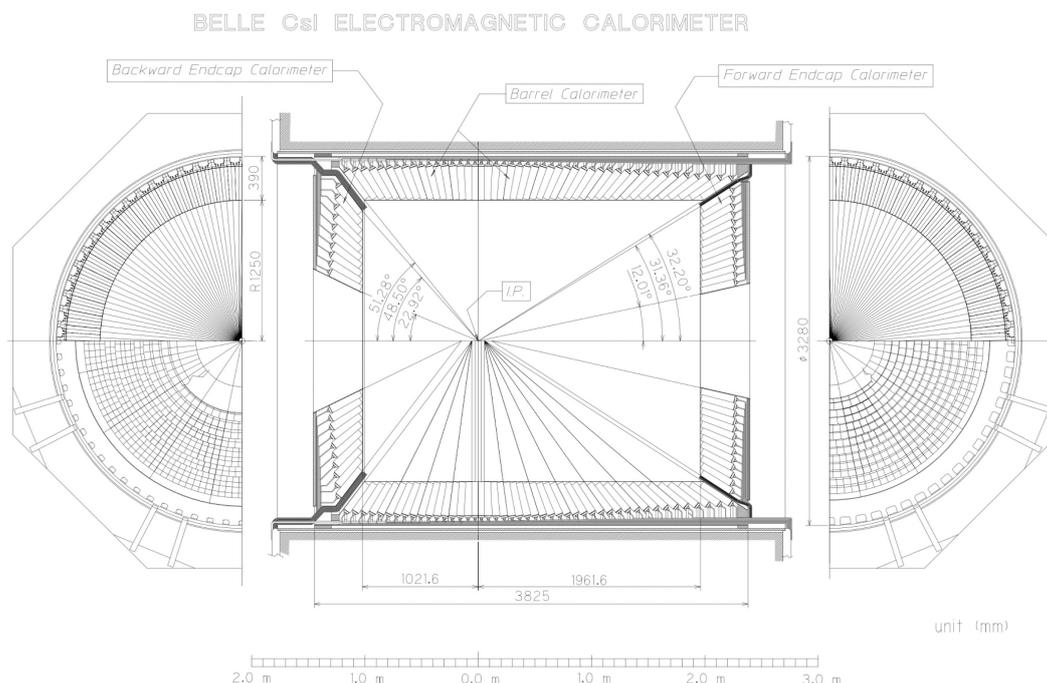


Figura 2.9: Disposizione geometrica dei cristalli di ECL.

Il calorimetro elettromagnetico è composto da 8736 cristalli con cui copre una regione di accettazione che va da  $\theta = 12.4^\circ$  a  $\theta = 155.1^\circ$ , con una risoluzione angolare che varia da  $0.74^\circ$  a  $0.17^\circ$  all'aumentare dell'energia delle particelle. Ogni cristallo ha una dimensione media (non possono essere tutti uguali vista la loro disposizione geometrica) di  $60 \times 60$  mm con una lunghezza di 300 mm (per un material budget di  $16.1 X_0$ ). Il cristallo viene quindi letto da due fotodiodi con una regione sensibile di  $10 \times 20$  mm, che inviano il segnale ad un amplificatore di carica montato direttamente sul cristallo.

Per sopperire all'aumento di background dato da SuperKEKB, è stata completamente ricostruita l'elettronica. Il nuovo sistema di lettura, chiamato "Shaper-DSP Board", è in grado di dimezzare lo "Shaping Time" portandolo a  $0.5 \mu\text{s}$ , dopodiché i segnali digitalizzati vengono letti da un modulo FPGA nel momento di ricezione del segnale di trigger inviato direttamente dai fotodiodi.

ECL viene utilizzato anche come misuratore di luminosità di SuperKEKB. Da notare, come si può vedere in fig. 2.9, i gaps nel punto di accoppiamento tra

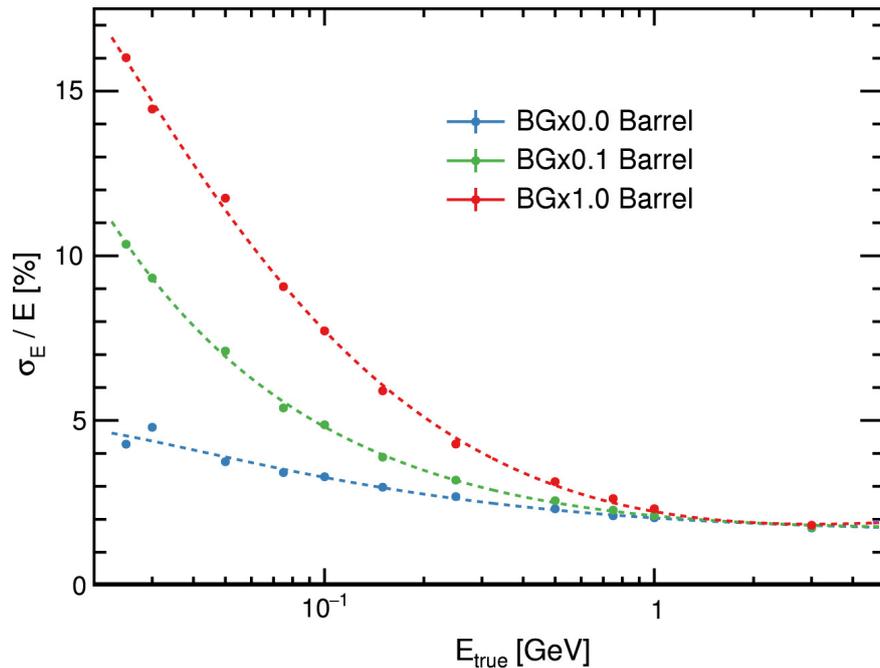


Figura 2.10: Risoluzione in energia del calorimetro elettromagnetico, dati simulati con e senza background [16].

la regione centrale e le due regioni avanti e dietro (su questo aspetto ritornerò nel capitolo dedicato all'analisi sul material budget di VXD).

### 2.3.4 Rivelatore di $K_L$ e muoni: KLM

Il sottorivelatore più esterno di Belle II è l'identificatore di  $K_L^0$  e di muoni, il KLM. Esso riprende i concetti di quello usato in Belle II, e anche la maggior parte della componentistica: è formato da un sandwich alternato a 14 strati, composto da piastre di ferro dello spessore di 47 mm - che fanno anche da ritorno di flusso del campo magnetico creato dal solenoide posto tra ECL e KLM - e da delle "Resistive-Plate-Chambers" (RPC, fig. 2.11). Sia queste ultime che le piastre di ferro sono state riutilizzate dal rivelatore di Belle. Le piastre di ferro hanno uno spessore pari a  $3.9\lambda_i$ , dove  $\lambda_i$  è lunghezza di interazione, che sommate alle  $0.8\lambda_i$  dell'ECL permettono ai  $K_L^0$  di formare cascate adroniche. Aspettandoci un incremento del background di neutroni (derivanti da fenomeni di scattering Bhabha), si è deciso di sostituire le RPC (meno efficienti all'aumentare della frequenza delle collisioni), nella parte avanti e dietro di KLM, oltre che nei due layers più interni della parte centrale. In queste regioni sono state inserite delle fibre scintillanti al termine delle quali vengono usati dei fotomoltiplicatori al silicio per la lettura (SiPM).

Le barre scintillanti hanno una dimensione di  $7 \times 40$  mm. La luce prodotta all'interno delle barre viene quindi trasportata ai fotomoltiplicatori (SiPMs) che hanno una risoluzione temporale di 7 ns. L'accettazione del KLM copre una regione che va da  $\theta = 20^\circ$  a  $\theta = 155^\circ$  ed ha un'efficienza di identificazione dei  $\mu$  di  $\sim 89\%$

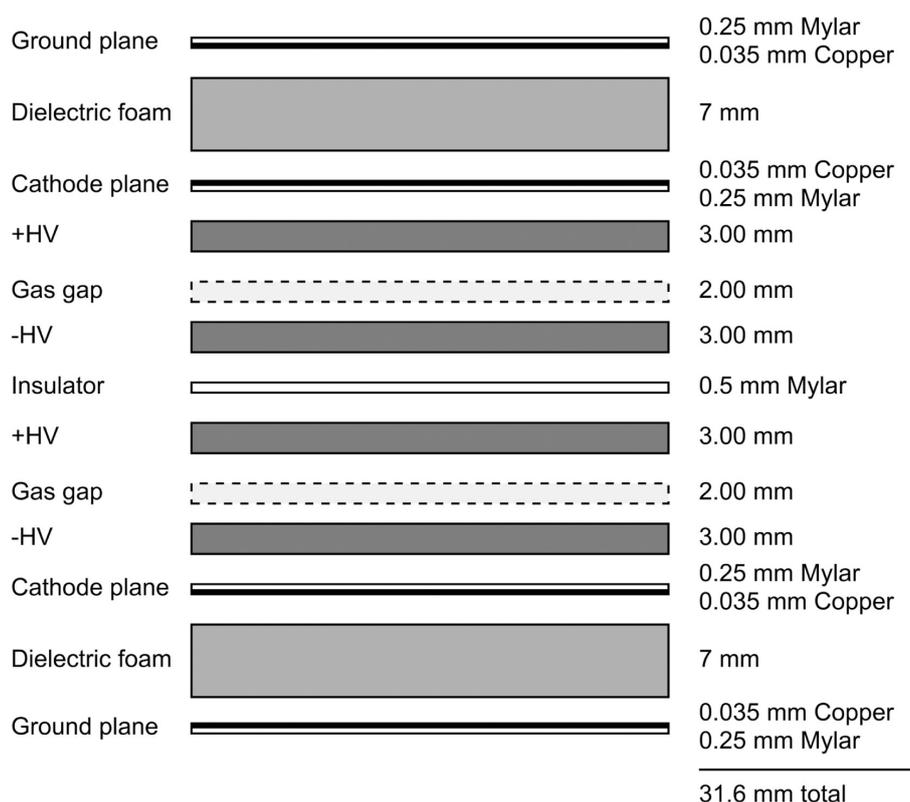


Figura 2.11: Schema di una singola RPC. Il campo elettrico generato dalle lastre di vetro, coperte da uno strato di vernice drogata al carbonio è di 4.3 kV/mm, mentre il gas contenuto nelle zone "vuote" è una mistura formata dal 62% HFC-134a (tetrafluoroetano), 30% Ar (argon) e 8% C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (butano). Le strisce di rame poste dopo lo strato di isolante (mylar), sono larghe 50 mm e vengono usate per leggere il segnale che una particella carica, ionizzando il gas, crea. Tra le due strisce di lettura viene messo uno strato di 7 mm di dielettrico che stabilisce una resistenza di 50 Ω tra le due strisce di rame. Ogni strato è formato da due RPC disposte ortogonalmente, così da avere un'informazione bidimensionale.

(per muoni con un impulso superiore a 1 GeV/c) contro quella dei  $K_L^0$  di  $\sim 80\%$  (per  $K_L^0$  con impulso superiore ai 3 GeV/c) [16].

### Solenioide

I piani di rivelazione del KLM sono inseriti nella struttura del ritorno di flusso del campo magnetico, che viene creato da un solenoide superconduttivo di niobio titanio e rame, di raggio 1.8 m per 3.92 m di lunghezza e avente massa di 7900 Kg. Il solenoide è posto all'interno di un criostato cilindrico di spessore 300 mm, posizionato tra l'ECL e il KLM. Il sistema di alimentazione è stato aggiornato rispetto a quello di Belle e fornisce al solenoide una corrente di 4096 A. La corrente fornita crea un campo magnetico di 1.5 T, misurato e mappato grazie ad uno strumento robotizzato appositamente costruito al CERN, in grado di rilevare il campo magnetico in più di 1.4 milioni di punti.

### 2.3.5 Sistema di trigger

Il sistema di trigger è di particolare importanza in un acceleratore ad alta luminosità. All'aumentare della luminosità aumenta anche il fondo di macchina prodotto. Un sistema di trigger, pensato per l'identificazione dei possibili candidati rispetto al background prodotto dall'acceleratore, è quindi fondamentale. Per fare ciò sono state aggiornate la logica di decisione del trigger di livello 1 (L1) e la velocità del trigger di livello alto (HLT), che nella logica sta a valle di L1. Il trigger di Belle II è stato pensato anche per scattare ad eventi che possono generare particelle non ancora identificate direttamente, come ad esempio eventi del tipo  $e^+e^- \rightarrow \gamma A$ , per la ricerca di assioni. In particolare il trigger di Belle II è stato pensato per rispettare le seguenti caratteristiche:

- Deve essere in grado di selezionare gli eventi provenienti da  $\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$  con un'efficienza il più vicino possibile al 100%.
- Deve avere una frequenza massima di trigger di 30 kHz, imposta dalle capacità di processare dati fornita dall'elettronica dei sottorivelatori.
- Una latenza fissata a  $5\mu s$ .
- Una risoluzione temporale minore a 10 ns.
- Una separazione temporale minima tra due eventi di 200 ns.

A parte il rivelatore di vertice, ogni sottorivelatore partecipa alla logica di trigger. Tutti i sottodetector inviano poi i loro segnali ad una scheda che si occupa della ricostruzione logica dell'evento a livello globale (GRL - Global Reconstruction Logic) e la passa alla scheda che invece si occupa di decidere se l'evento sia effettivamente da registrare o da scartare (GDL - Global Decision Logic). In particolare i sottorivelatori, hanno le seguenti mansioni:

- La linea di trigger della CDC tramite la tracciatura delle particelle si occupa di scartare quelle non provenienti dall'IP (Interaction Point).
- Il trigger dell'ECL è in grado di scartare gli eventi generati dallo scattering Bhabha, che in genere hanno una topologia con una simmetria centrale (back-to-back), viene inoltre usato per misurare la luminosità dell'acceleratore.
- il TOP restituisce un'informazione precisa sul tempo dell'evento
- KLM si occupa di selezionare gli eventi  $\mu^+ \mu^-$  e di misurare l'efficienza degli altri sottorivelatori negli eventi con una molteplicità bassa.

Una volta superato il trigger di livello 1, i dati vengono analizzati dal trigger di alto livello, che per prima cosa considera dati ricostruiti utilizzando solo la CDC e l'ECL, controllando quindi la molteplicità, il tracking e l'energia depositata. Questa prima parte del sistema di trigger di alto livello, mediamente scarta la metà dei dati entranti nell'HLT. Fatto questo, il trigger di alto livello continua la sua analisi con i dati rimanenti e ricostruisce l'evento usando i dati provenienti da tutti i sottorivelatori. In particolare viene fatta una selezione dei dati: questa selezione utilizza delle *skims*. Le skims sono dei filtri per i dati, usate per le analisi offline. Vengono usate le skims così da evitare di aggiungere incertezze sistematiche dovute ad un utilizzo diverso dei filtri online e offline. Dopo l'applicazione del trigger di alto livello i dati rimanenti sono mediamente il 12.5% del totale dei dati entranti nel trigger di primo livello. Per tutto questo tempo i dati provenienti dal rivelatore di vertice rimangono immagazzinati in un buffer dedicato, in grado di mantenerli in memoria per un massimo di 5 ms.

## 2.4 VXD e VTX

In questa sezione mi occuperò più nello specifico del rivelatore di vertice. Introdurrò anche il suo upgrade, il rivelatore di vertice VTX, su cui mostrerò gli studi fatti su alcune delle sue componenti nel capitolo 4.

### 2.4.1 VXD (VerteX Detector)

VXD (VerteX Detector) è il rivelatore di vertice dell'esperimento Belle II. È complessivamente formato da 6 layers ed è composto da due sottorivelatori, il rivelatore a pixel PXD (PiXel Detector) - di cui fanno parte i primi 2 layers - e il rivelatore a strip SVD (Silicon Vertex Detector) di cui fanno parte i restanti 4 layers più esterni.

#### PXD

Il design di PXD prevede due layers, di cui però ad oggi solo il primo è stato installato completamente nel detector, mentre il secondo, per ritardi dovuti a

problemi riscontrati in fase di produzione, ad oggi è composto da soli due moduli (questa informazione tornerà utile nel capitolo in cui analizzo il material budget di VXD). È prevista l'installazione completa durante il primo long shutdown (LS1) previsto per il 2023. Il layer 1 è composto da 8 moduli, mentre il layer 2 è composto da 12 moduli. Ogni modulo è diviso in due sensori posti simmetricamente uno con l'altro ed assemblati tra di loro utilizzando dei supporti di ceramica. Ogni sensore è composto da una matrice di  $250 \times 768$  pixels, di dimensione diversa a seconda del punto di installazione. Per minimizzare il material budget, l'area sensibile di ogni modulo è spessa solo  $75 \mu\text{m}$ . Ogni modulo ha una sovrapposizione di un millimetro con il modulo a fianco: in questo modo si copre in maniera uniforme tutta l'area intorno al beam-pipe in maniera simmetrica rispetto ad essa, come mostrato in Fig. 2.12 (i dettagli geometrici sono riportati in tab. 2.2. Inoltre, la sovrapposizione di una parte di area sensibile permette anche di valutare l'allineamento dei moduli e di correggere le ricostruzioni delle tracce andando ad aumentare sensibilmente la risoluzione di vertice. Il material budget di un singolo sensore è  $\sim 0.2\% X_0$ .

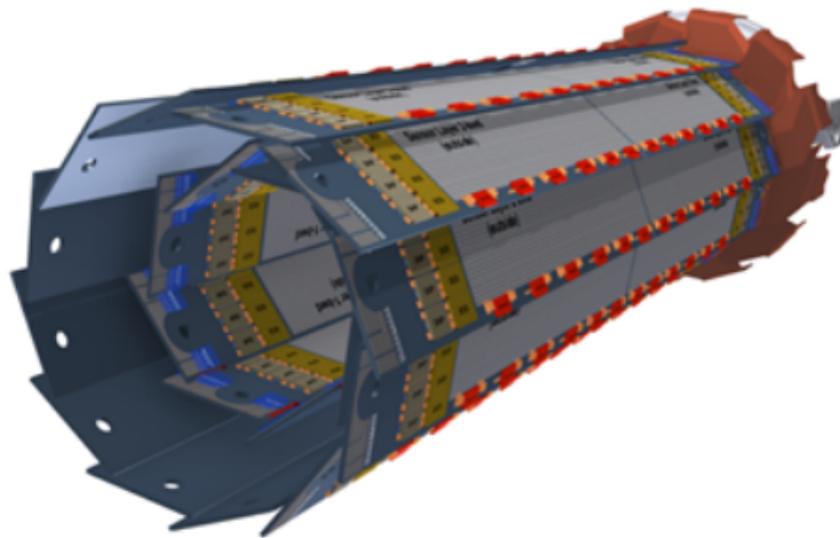


Figura 2.12: Disegno CAD di PXD. Il rivelatore a pixel copre un angolo di accettazione tra  $\theta = 17^\circ$  e  $\theta = 150^\circ$ .

I pixels sono alimentati da delle piste ricavate da due strati di alluminio e una di rame all'interno del wafer di silicio, mentre il segnale viene trasportato da altre piste ricavate sui medesimi strati metallici. Il controllo dei pixels è affidato a 6 chip - per ogni sensore - posti direttamente sul silicio, ognuno dei quali è composto da 32 porte e 32 uscite, mentre i condensatori da 50 pf sono posti alla fine del silicio nella regione non attiva. La struttura di supporto di PXD (posta all'esterno dei moduli), comprende anche il sistema di raffreddamento

evaporativo a CO<sub>2</sub> per l'elettronica, mentre i pixels - funzionando a bassa corrente - vengono raffreddati semplicemente facendo fluire aria sulla loro superficie.

	Layer 1	Layer 2
# moduli	8	12
Distanza dall'IP	14 mm	22 mm
Spessore	75 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$
# pixels	$3.072 \times 10^6$	$4.608 \times 10^6$
Dimensione media pixels	$55.6 \times 50 \mu\text{m}^2$	$70.85 \times 50 \mu\text{m}^2$
Area attiva	$44.8 \times 12.5 \text{ mm}^2$	$61.44 \times 12.5 \text{ mm}^2$
Lunghezza sensore	90 mm	123 mm
Frequenza di lavoro	50 kHz/10 MHz	50 kHz/10 MHz

Tabella 2.2: Parametri dei moduli di PXD [18]

I sensori di PXD sono dei DEPFET (DEPleted p-channel Field Effect Transistor) composti da un transistor MOSFET posti al di sopra di uno strato di silicio n-type ad alta resistività. Quando una particella carica attraversa questo strato, crea una coppia elettrone-lacuna. Grazie al campo elettrico creato dalla tensione di bias del transistor, gli elettroni si spostano verso l'area denominata *internal gate* (vedi fig. 2.13). Lo spostamento interferisce sul passaggio di corrente che fluisce attraverso *gate FET*. Il gate FET mette in collegamento il *source* e il *drain*, quest'ultimo collegato ad un amplificatore. A questo punto la carica accumulata nell'*internal gate* rimane lì, grazie alla tensione di alimentazione, fino a che non viene applicata una tensione al *clear gate* che la disperde. Ciò permette di leggere più pixel su una stessa colonna uno per volta attraverso un solo amplificatore (sistema *rolling-shutter*) [18].

L'elettronica di lettura impiega un tempo di circa  $\sim 20\mu\text{s}$  - tempo di un intero ciclo di lettura rolling-shutter - che significa che più eventi possono sovrapporsi durante un ciclo di lettura. Per questo motivo PXD viene utilizzato per aumentare la risoluzione delle tracce trovate dalla CDC e da SVD, senza però poter contribuire al sistema di trigger.

## SVD

SVD è composto da 4 layers disposti rispettivamente ad una distanza dalla beam-pipe di 39 mm, 80 mm, 104 mm e 135 mm, che coprono una regione di accettazione che, come per PXD, spazia da  $\theta = 17^\circ$  a  $\theta = 150^\circ$ . Ogni layer è composto da un numero di sensori che varia in base al layer disposti come riportato in fig. 2.14 (i dettagli sono elencati in tab. 2.3). Ogni sensore è composto da due strati di strip di silicio disposte sulle due facce ortogonalmente, in modo da avere un'informazione bidimensionale.

In particolare SVD è formato da tre diversi tipi di sensori DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector). Nel layer 3, per ogni modulo sono usati 2 sensori DSSD rettangolari più piccoli disposti alla stessa distanza rispetto alla direzione del fascio, mentre per i sensori centrali dei layer 4, 5 e 6 sono usati sensori DSSD

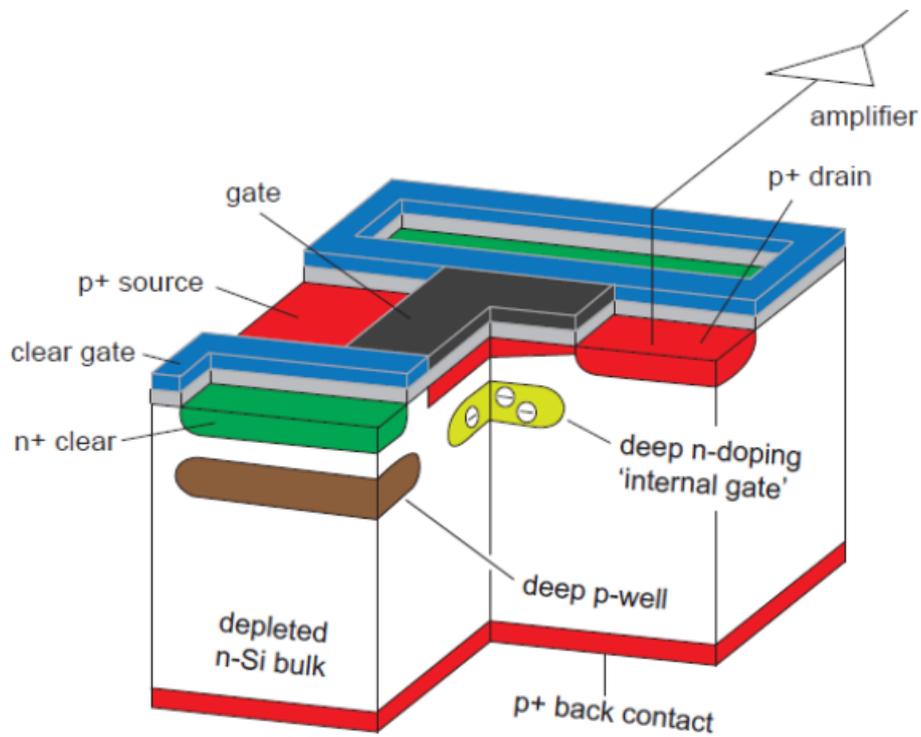


Figura 2.13: Schema di un pixel DEPFET.

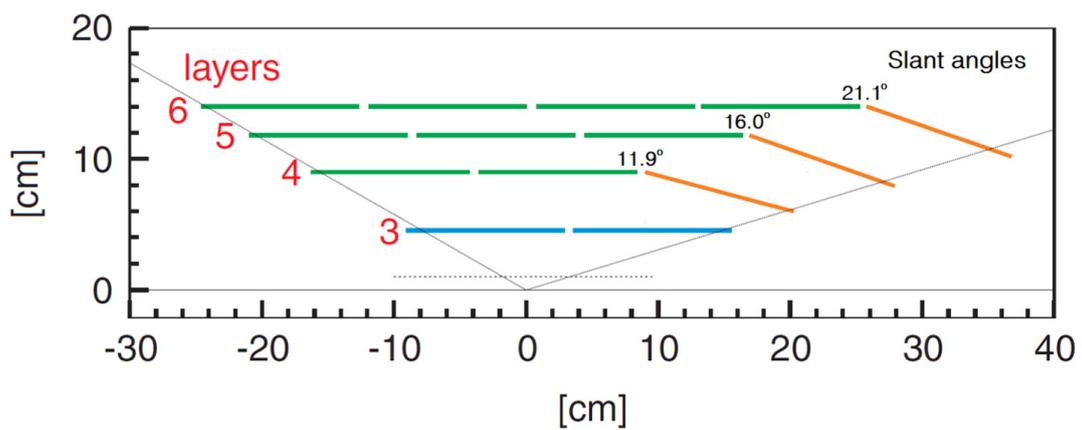


Figura 2.14: Vista schematica del posizionamento dei sensori di SVD.

rettangolari più grandi. Infine, per le regioni in avanti (in arancione in figura 2.14) sono utilizzati sensori DSSD di forma trapezoidale. Questi ultimi sono inclinati in modo da minimizzare il material budget (di  $\sim 0.7\% X_0$ ) coprendo la stessa regione di accettazione.

	Layer 3	Layer 4
Dist da IP	39 mm	80 mm
# moduli	7	10
# sensori	14	30
# strips	768 + 768	768 + 512
area attiva	$122.9 \times 38.55$	$122.9 \times 57.72$ ( $122 \times 57.59 - 38.42$ )
spessore sensori	320 $\mu\text{m}$	320 $\mu\text{m}$ (300 $\mu\text{m}$ )
	Layer 5	Layer 6
Dist da IP	104 mm	135 mm
# moduli	12	16
# sensori	48	80
# strips	768 + 512	768 + 512
area attiva	$122.9 \times 57.72$ ( $122 \times 57.59 - 38.42$ )	$122.9 \times 57.72$ ( $122 \times 57.59 - 38.42$ )
spessore sensori	320 $\mu\text{m}$ (300 $\mu\text{m}$ )	320 $\mu\text{m}$ (300 $\mu\text{m}$ )

Tabella 2.3: Parametri di SVD. I dati tra parentesi si riferiscono ai sensori trapezoidali della zona in avanti [19].

Oltre al silicio, ogni modulo è composto da uno strato isolante in AIREX foam e dall'elettronica di lettura composta da un circuito flessibile chiamati origami o hybrid - a seconda se si tratti di un sensore centrale o di quelli della zona in avanti - su cui sono inseriti i chip di lettura APV25. Come struttura di supporto, vengono utilizzate due *ribs* di carbonio. Come mostrato in fig. 2.15, ogni modulo alle sue estremità presenta degli *endmount* collegati alle *ribs* che servono a fissarlo ai coni in carbonio tramite degli anelli *end ring* di supporto. Infine per evitare di avere delle aree cieche e per l'allineamento, ogni modulo ha una sovrapposizione di 1 mm sul suo lato lungo con il modulo a fianco, come nel rivelatore PXD.

Gli APV25 dissipano 0.35 W ognuno, vengono quindi raffreddati da un tubicino di raffreddamento che passa sopra ad ognuno di essi (sono quindi stati disposti sulla stessa linea) all'interno dell'area attiva. Gli APV25 sono chip di lettura sviluppati per l'esperimento CMS al CERN. Il loro tempo di *shaping* è di 50 ns e la resistenza alle radiazioni è  $> 1$  MGy [19]. Una volta ricevuto il segnale, gli APV25 lo inviano ad un FADC (Flash Analog to Digital Converter) che ne digitalizza il segnale e, una volta ricevuto un segnale di trigger, invia i dati alla scheda COPPER (COmmon Pipeline Platform for Electronics Redout) su cui vengono processati attraverso il sistema di trigger di alto livello (HLT). Se HLT non li filtra, i dati vengono quindi immagazzinati.

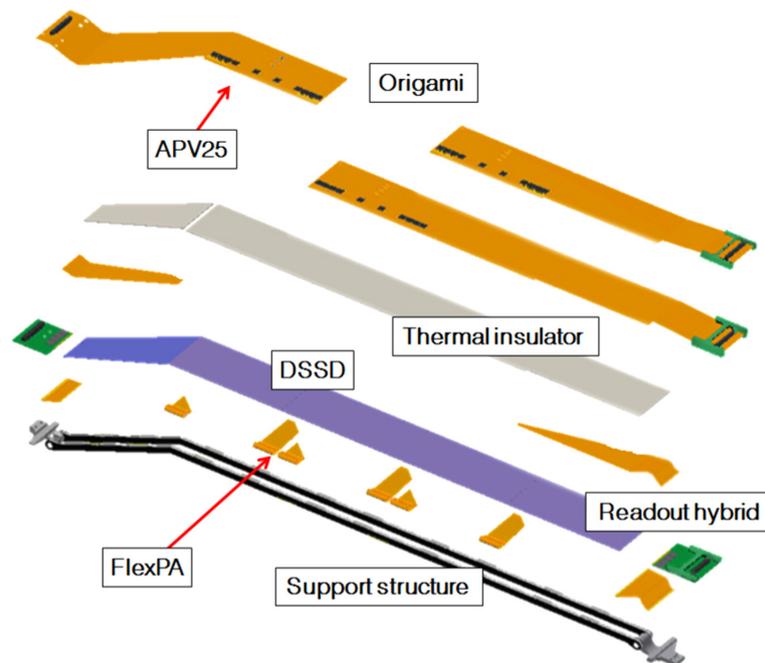


Figura 2.15: Layout di un modulo di SVD. La figura in particolare si riferisce ad un modulo del layer 6.

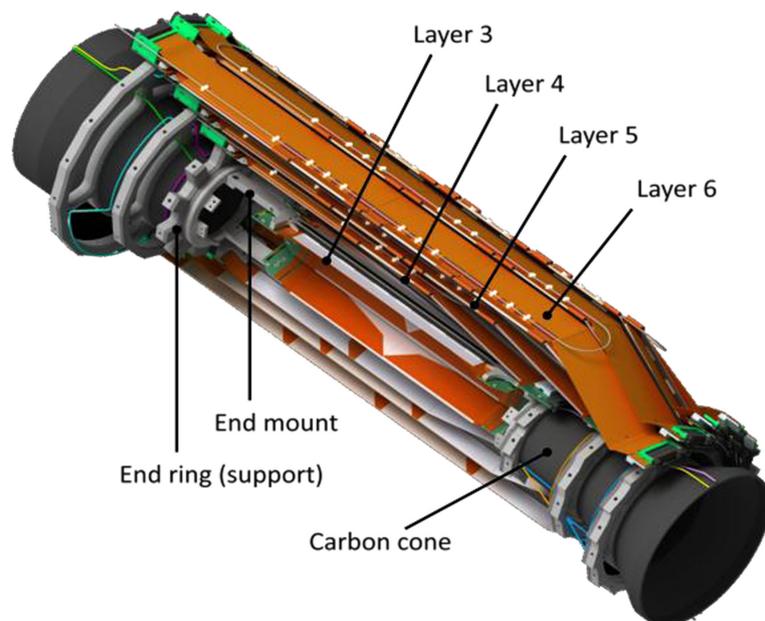


Figura 2.16: Vista in sezione del modello CAD di SVD.

I sensori utilizzati sono a strip di silicio *double-side* ortogonali, in modo da poter avere un'informazione su due dimensioni. In particolare le strip in direzione longitudinale sono quelle p-side, mentre quelle in direzione trasversale sono quelle n-side. Rispetto a PXD in questa parte di rivelatore sono stati utilizzati dei sensori a strip di silicio perché, essendo più lontani dal punto di interazione, il flusso di particelle per unità di superficie risulta minore.

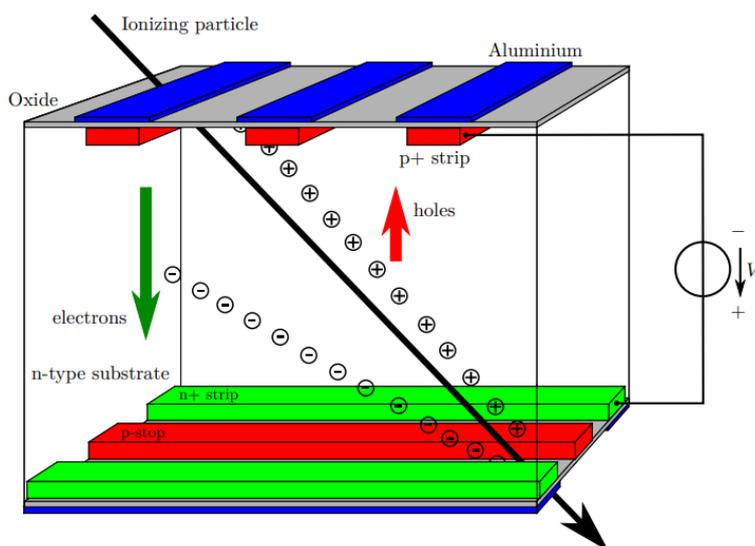


Figura 2.17: Principio di funzionamento dei sensori di SVD [20].

Un sensore a strip di silicio come quello di SVD funziona applicando una tensione di bias tra le giunzioni p-type ed n-type che crea un campo elettrico all'interno della regione *depleted* del sensore. Una particella carica che attraversa la regione ne ionizza gli atomi creando quindi delle coppie elettrone-lacuna che si spostano lungo la direzione del campo elettrico (o in senso opposto), come mostrato in fig. 2.17. Questo spostamento crea un segnale in corrente che viene letto dal sistema di lettura e immagazzinato nel buffer degli APV25, in attesa di un eventuale segnale di trigger. La posizione della particella viene ricostruita mediante una media pesata con il segnale delle strip investite.

## 2.4.2 Descrizione di VTX

Il rivelatore VXD ha operato sempre con un'efficienza superiore al 90% fin dall'inizio della presa dati di Belle II nel 2019. Con i ritmi di acquisizione attuale (la luminosità istantanea di SuperKEKB è costantemente sopra a  $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), ci si aspetta di poter accumulare la stessa quantità di dati di Belle entro il primo long shutdown (LS1), programmato per la fine del 2022 e che durerà per tutto il 2023.

L'alto background prodotto dall'acceleratore sta degradando i sottorivelatori e se non verrà in qualche modo ridotto, si dovrà diminuire la luminosità. Pur non essendo considerato il sottorivelatore più critico (i sottorivelatori più critici da questo punto di vista sono TOP e CDC), ci si aspetta che col passare della presa dati, anche PXD e SVD possano iniziare a dare problemi.

Inoltre, il limite di occupancy su SVD che il sistema di tracciatura è in grado di processare, è considerato circa il 3%. Il long shutdown 2 (LS2) è stato programmato per installare in SuperKEKB gli aggiornamenti pensati per renderlo operativo alla luminosità di picco nominale. Come si può vedere dalla fig. 2.18, quando SuperKEKB arriverà alla luminosità di picco per cui è stato progettato ( $6.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), ci si avvicinerà pericolosamente al limite di occupancy per cui SVD è stato progettato. Infine, è probabile che siano necessarie modifiche alla geometria della regione di interazione per raggiungere la luminosità di progetto.

Per questi motivi si è resa necessaria la progettazione e la futura realizzazione, di un nuovo rivelatore di vertice, VTX, che ha lo scopo di sostituire VXD durante LS2, programmato per il 2026-2027.

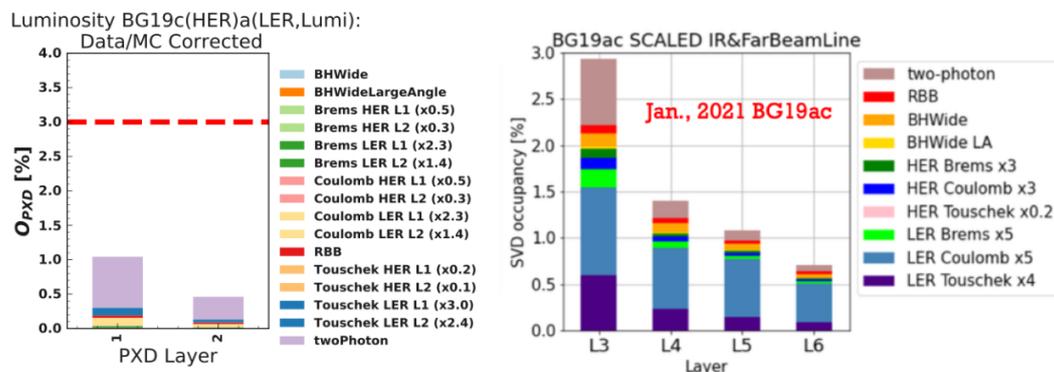


Figura 2.18: Occupancy attesa, a luminosità nominale, di PXD a destra ed SVD a sinistra. Per avere un'alta efficienza del sistema di tracciatura l'occupancy (su SVD e PXD) deve essere inferiore al 3%.

## Obiettivi di VTX

La prima cosa da dire è che VTX occuperà approssimativamente lo stesso spazio geometrico utilizzato ora da VXD e ne coprirà lo stesso angolo solido (tra  $\theta = 17^\circ$  e  $\theta = 150^\circ$  e l'angolo completo in  $\phi$ ). Al contrario di VXD però, VTX sarà

composto da 5 layers (anche se si sta portando avanti anche uno studio sulla possibilità di creare un rivelatore a 7 layers). VTX sarà un rivelatore di vertice a pixel in tutti i suoi layers.

In particolare, con VTX ci si aspetta di ottenere i seguenti vantaggi:

- Una migliore capacità di sostenere il livello di background prodotto dall'acceleratore, grazie ad un'occupancy minore, data dalla maggiore segmentazione e velocità di lettura.
- Un aumento dell'efficienza nel trovare le tracce delle particelle, specialmente a basso impulso trasverso e quindi una più alta risoluzione di vertice.
- Un minore "integration time" rispetto a PXD.
- Una minore larghezza di banda grazie ad un primo sistema di lettura direttamente sui CMOS.
- Un sistema di alimentazione in serie per i layer interni, che richiedendo meno cavi, permette di ridurre il material budget.
- Si cercherà di rendere VTX in grado di contribuire sia al trigger di alto livello, che a quello di livello 1.
- Un sistema unificato nel controllo del rivelatore di vertice (al contrario della situazione odierna).
- Un'integrazione col rivelatore migliore, così da ridurre ulteriormente il material budget e lasciare ulteriore spazio per altri scudi e collimatori nella regione di interazione.

Nelle sezioni successive spiegherò in che modo VTX potrà raggiungere gli obiettivi proposti.

## Sensori

I sensori che andranno a comporre VTX saranno dei sensori a Pixel CMOS, per il quale ci si è affidati alla tecnologia TJ-180 nm, proposta dall'azienda Tower Jazz. Tower Jazz infatti ha prodotto i sensori ALPIDE, una tipologia di sensori già realizzata su specifiche dell'esperimento ALICE al CERN. I sensori utilizzati da ALICE, sono quindi stati usati come progetto di partenza per soddisfare i requisiti richiesti dal rivelatore a pixel di ATLAS. Questi sensori, chiamati TJ-Monopix 2, sono in fase di sviluppo e i primi prototipi sono già stati testati (le caratteristiche di questi sensori sono riportate in tab. 2.4, insieme alle specifiche richieste da VTX).

Come si può vedere dalla tabella, non tutte le caratteristiche richieste da Belle II sono soddisfatte dai TJ-Monopix 2, come ad esempio la potenza di lavoro, per questo motivo si è deciso di usare questi prototipi come base di sviluppo per dei nuovi sensori appositamente creati per VTX. Il gruppo che si occupa della progettazione di questi nuovi sensori, chiamati OBELIX (Optimized BELle II pIXel), ha definito una serie di caratteristiche che dovranno essere soddisfatte:

	ALPIDE	TJ-Monopix2	OBELIX
tecnologia	TJ-180 nm	TJ-180 nm	
dimensione pixels	$29 \times 27 \mu\text{m}^2$	$33 \times 33 \mu\text{m}^2$	$\sim 35 \times 35 \mu\text{m}^2$
matrice	$1024 \times 512$	$512 \times 512$	
area sensibile	$27.5 \times 15.0 \text{ mm}^2$	$31.0 \times 13.6 \text{ mm}^2$	$30 \times 20 \text{ mm}^2$
timing	5000 ns	25 ns	$\mathcal{O}(100)$ ns
larghezza banda	1200 Mbits/s	320 Mbits/s	$\mathcal{O}(320)$ Mbits/s
Potenza dissipata	$18 - 35 \text{ mW/cm}^2$	$\mathcal{O}(200) \text{ mW/cm}^2$	$< 200 \text{ mW/cm}^2$
Hit rate	$< 10 \text{ MHz/cm}^2$	$> 100 \text{ MHz/cm}^2$	$< 150 \text{ MHz/cm}^2$
TID	27 kGy	1000 kGy	1000 kGy

Tabella 2.4: Confronto tra le caratteristiche dei sensori su cui si basa il progetto OBELIX. Nella colonna di destra i requisiti richiesti dal rivelatore di vertice VTX, gli spazi vuoti indicano che non ci sono richieste specifiche [21].

**Pixel/pixel array** : migliorare il rumore di fondo e diminuire l'impedenza creata dalla rete di alimentazione, inoltre si potrebbe anche diminuire la risoluzione di timing così da diminuire il consumo di energia.

**Parte digitale** : bisognerà migliorare la memoria per immagazzinare i dati, pensandola per essere utilizzata nella logica di trigger.

**Alimentazione** : ci dovrà essere un'area dedicata per un regolatore di potenza a bassa caduta di tensione, nel caso si opti per un'alimentazione in serie dei sensori nei layers interni.

### Geometria Proposta

La geometria di VTX sarà composta da due differenti design, uno per i due layers interni iVTX e l'altro per i 3 o 5 layers esterni oVTX. I due layers interni saranno supportati da un frame di silicio su cui verranno realizzati 4 sensori, così da avere un modulo "all-silicon". Una proposta di design di questo tipo di modulo è mostrata in Fig. 2.19

I moduli interni di VTX avranno un material budget di  $0.1\% X_0$ . I due layers saranno posti ad una distanza di 14 mm e 24 mm, rispettivamente per L1 e L2, e saranno lunghi tra i 120 mm e i 140 mm.

I moduli più esterni invece (oVTX) hanno una struttura di supporto ispirata al concetto utilizzato nell'ALICE ITS, composto da un traliccio leggero in materiale composito che sosterrà una piastra per la dissipazione termica a cui saranno incollati i sensori e il circuito flex. Il layer più esterno sarà posto a 140 mm dal punto di interazione e avrà una lunghezza di 720 mm. Non mi soffermerò oltre sulla geometria dei layers esterni, dato che ne parlerò approfonditamente nel capitolo 4, dedicato alla caratterizzazione del modulo più esterno. In fig. 2.20 è rappresentato il disegno CAD di un modulo del layer 5.

Insieme, iVTX e oVTX, vanno a formare l'intero rivelatore di vertice VTX (in fig. 2.21 è presentato un modello CAD di VTX nella sua versione a 5 layers)

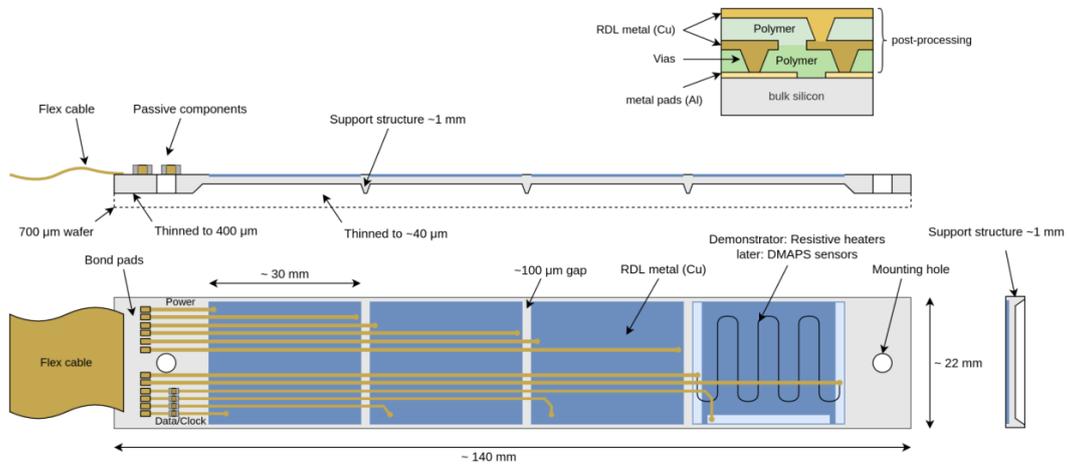


Figura 2.19: Disegno progettuale dei due layers interni di VTX.

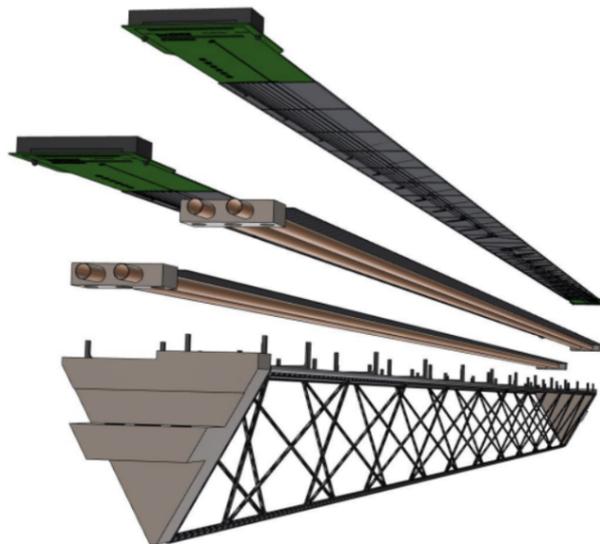


Figura 2.20: Disegno CAD di un modulo del layer 5 di VTX.

che dovrebbe portare un miglioramento consistente dell'efficienza di tracking. A tal proposito, gli studi di confronto tra il rivelatore attuale VXD e VTX sono presentati nella sezione seguente.

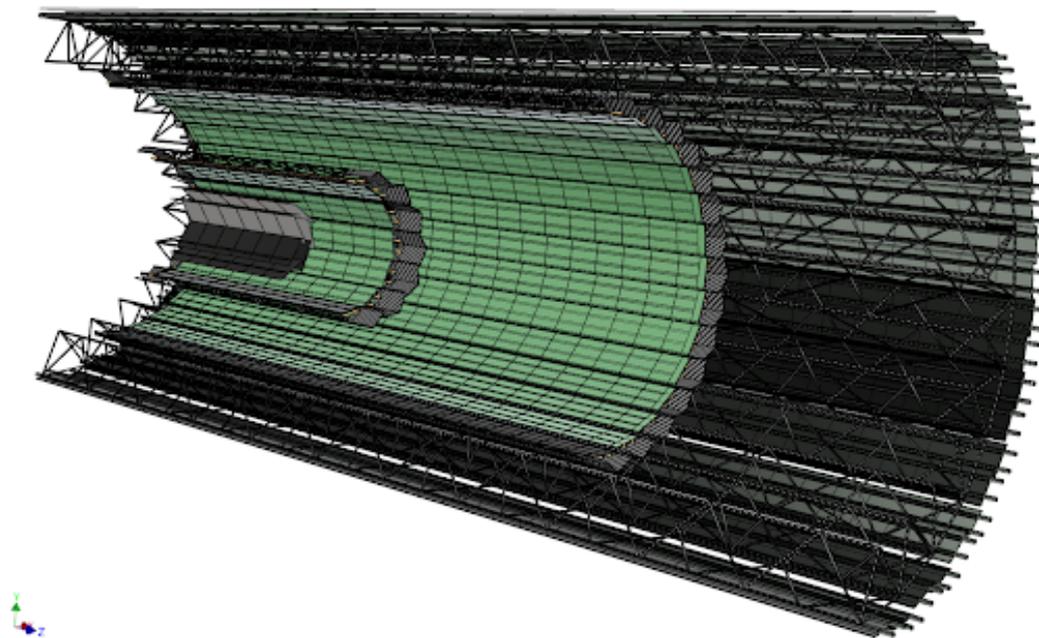


Figura 2.21: vista in sezione del rivelatore di vertice VTX a 5 layers.

### Confronto tra VXD e VTX

Studi per confrontare l'attuale rivelatore di vertice con VTX hanno dato risultati soddisfacenti. L'efficienza di tracking è stata la prima cosa misurata, sono state fatte delle simulazioni Monte Carlo di decadimenti  $B^0 \rightarrow D^* \mu \nu \rightarrow (D^0 \pi) \mu \nu$ , in cui il  $D^0$  decade in  $K\pi$  oppure  $K3\pi$ . Questo canale è di particolare interesse ed è uno degli eventi più studiati a Belle II. Una volta prodotti gli eventi e simulati, sono stati ricostruiti in entrambi i casi (sia simulando VXD che VTX) tramite il software BASF2, di cui parlerò nella prossima sezione. I risultati sono mostrati in tab. 2.5 e sono basati su un campione di  $10^4$  eventi Monte Carlo.

	$K\pi$		$K3\pi$	
	VXD	VTX	VXD	VTX
# eventi	3276		6752	
Candidati	954	1443	581	1037
Falsi Candidati	381	426	2267	3901
Efficienza	29%	44%	8.6%	15%
Purity	71%	77%	20%	21%

Tabella 2.5: Confronto tra le performance di ricostruzione di VXD vs VTX.

Come si può vedere dalla tabella l'efficienza è notevolmente migliorata (più del 70%) nel caso con un solo pione ed è quasi raddoppiata negli eventi a 3 pioni.

Inoltre in fig. 2.22 viene mostrata l'efficienza di ricostruzione dei  $B^0$  in funzione del momento trasverso, anche in questo caso si può notare un miglioramento sensibile nel caso di VTX.

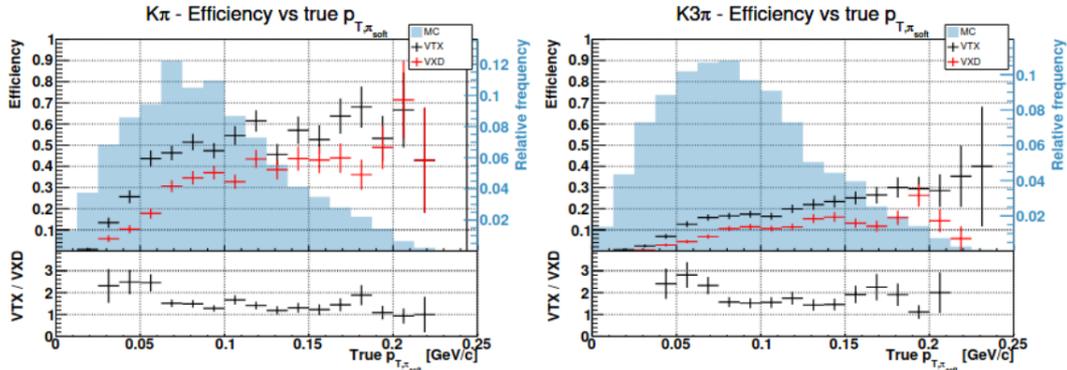


Figura 2.22: Confronto tra l'efficienza di ricostruzione di  $B^0$  tramite i canali  $K\pi$  a sinistra e  $K3\pi$  a destra, in funzione del momento trasverso [21].

Oltre al tracking, con gli stessi eventi Monte Carlo è stata confrontata anche la risoluzione di vertice tra VXD e VTX e la risoluzione sui parametri di impatto. I risultati della risoluzione dei vertici sono mostrati in tab. 2.6, mentre la risoluzione sui parametri di impatto è riportata in fig. 2.23. In questo caso ci si aspetta un miglioramento di  $\sim 20\%$ , come mostrato dai risultati in tabella.

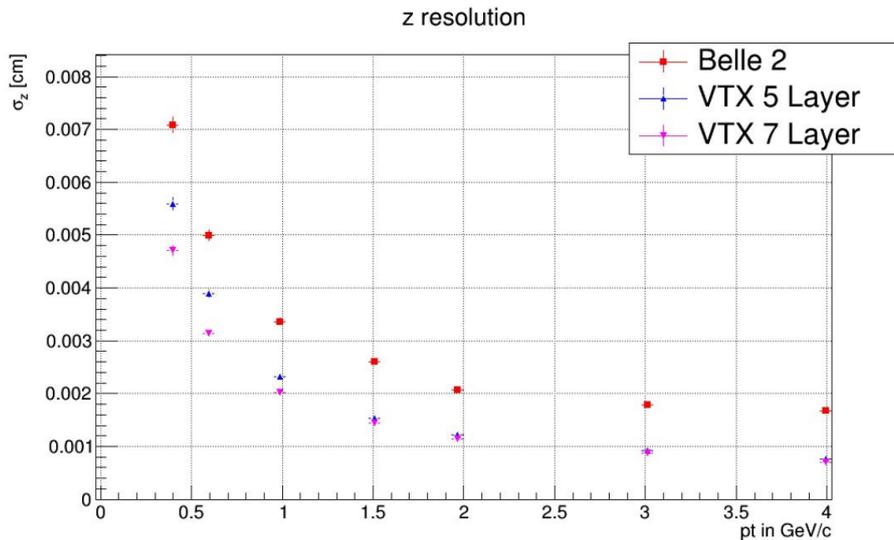


Figura 2.23: Confronto sulla risoluzione del parametro di impatto Z in funzione dell'impulso trasverso tra l'attuale VXD e VTX nelle configurazioni a 5 e 7 layers [21].

		VXD	VTX	VXD/VTX	
		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$		
$B^0$	$x_{\text{decay}}$	$24 \pm 1$	$17 \pm 1$	$0.71 \pm 0.07$	
	$y_{\text{decay}}$	$23 \pm 1$	$18 \pm 1$	$0.78 \pm 0.08$	
	$z_{\text{decay}}$	$24 \pm 1$	$17 \pm 1$	$0.71 \pm 0.07$	
$K\pi$	$x_{\text{decay}}$	$27 \pm 1$	$20 \pm 1$	$0.72 \pm 0.06$	
	$D^0$	$y_{\text{decay}}$	$25 \pm 1$	$20 \pm 1$	$0.80 \pm 0.07$
		$z_{\text{decay}}$	$26 \pm 1$	$18 \pm 1$	$0.71 \pm 0.07$
		$l_{\text{flight}}$	$56 \pm 2$	$44 \pm 2$	$0.77 \pm 0.06$
$B^0$	$x_{\text{decay}}$	$24 \pm 1$	$20 \pm 1$	$0.83 \pm 0.08$	
	$y_{\text{decay}}$	$25 \pm 1$	$20 \pm 1$	$0.80 \pm 0.07$	
	$z_{\text{decay}}$	$25 \pm 1$	$19 \pm 1$	$0.76 \pm 0.07$	
$K3\pi$	$x_{\text{decay}}$	$27 \pm 1$	$23 \pm 1$	$0.85 \pm 0.07$	
	$D^0$	$y_{\text{decay}}$	$28 \pm 1$	$22 \pm 1$	$0.80 \pm 0.07$
		$z_{\text{decay}}$	$28 \pm 1$	$21 \pm 1$	$0.75 \pm 0.06$
		$l_{\text{flight}}$	$56 \pm 2$	$46 \pm 2$	$0.82 \pm 0.07$

Tabella 2.6: Risoluzione di vertice dei  $B^0$  e dei  $D^0$  [22].

## 2.5 Belle Analysis Framework II: BASF2

BASF2 è il software ufficiale sviluppato dalla collaborazione e da poco reso open source (<https://github.com/belle2/basf2>).

L'architettura di BASF2 è composta essenzialmente da due livelli differenti, un primo livello, scritto in C++, e un secondo livello di utilizzo da parte dell'utente, che invece scrive il suo programma di analisi in python [23]. BASF2 infatti è un software *object oriented*, in cui i moduli sono specifici per fare determinati compiti all'interno di una analisi, ad esempio ogni sottorivelatore ha la sua parte di codice composta da moduli dedicati a quello che il sottorivelatore può fare. L'utente finale non deve fare altro che definire un *path* all'interno del quale "richiama" i moduli che gli servono (naturalmente ogni modulo richiede determinati input e restituisce i dati per cui è stato sviluppato). Una catena di moduli può essere costruita in qualsiasi modo, possono anche essere richiamati più *path* in parallelo a seconda delle condizioni prestabilite (fig. 2.24), tenendo però in mente che il framework richiama i moduli serialmente, nell'ordine stabilito dall'utente, se quindi ad esempio un modulo necessita di un input che ritorna da un altro modulo, questo secondo modulo deve per forza di cose essere richiamato precedentemente al primo.

### 2.5.1 Steering file

Il file che contiene tutte le richieste e organizza i dati in entrata e in uscita dai vari moduli, si chiama *steering file*. A differenza dei moduli, è scritto in python, un linguaggio che è sicuramente più accessibile ad un utilizzatore finale senza conoscenze approfondite di sviluppo software. All'interno dello steering file, l'u-

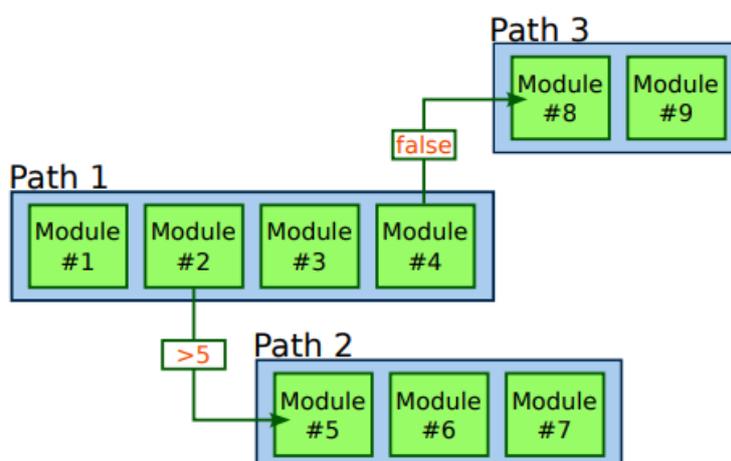


Figura 2.24: architettura di funzionamento di BASF2, i moduli vengono richiamati dal framework da sinistra verso destra.

tente si deve occupare di richiamare i vari moduli richiesti, oltre che indicare dove immagazzinare i dati raccolti (anche questo richiamando uno specifico modulo). Questo tipo di architettura, permette di mantenere un algoritmo di analisi il più snello possibile, vengono infatti richiamati solo i moduli necessari, mentre quelli non utilizzati, restano a disposizione ma non caricati e non viene quindi allocata memoria per questi, come se non facessero parte del programma.

Dato che ogni modulo riceve e restituisce dati, il programma ha bisogno di memoria, che è gestita tramite il *DataStore* in 3 diversi modi: per un singolo evento, per la durata di un singolo run, o per la durata totale dell'esperimento. I dati vengono sempre gestiti utilizzando i protocolli di ROOT, anche il *DataStore* stesso è basato sui protocolli ROOT.

Quando BASF2 deve eseguire compiti che richiedono tempi particolarmente rapidi, come il trigger di alto livello ad esempio, oppure particolarmente complicati, i compiti vengono parallelizzati tramite un *ring buffer* che si occupa di dividere i dati di un path in path paralleli, e poi di riunire i dati per tornare ad un singolo path. Non tutti i moduli possono essere parallelizzati, a questo proposito, BASF2 utilizza quindi una funzione chiamata *ParallelProcessingCertified* creata appositamente allo scopo di scegliere se un modulo può o non può essere parallelizzato.

## 2.5.2 Geometria

La geometria del rivelatore corrisponde alla descrizione della posizione nominale delle varie componenti, ricavata dai disegni di progetto semplificati. Praticamente ogni parte del software utilizza la geometria, dal Monte Carlo, alla ricostruzione delle tracce, ecco perché tutti i dati che ne contengono l'informazione devono essere gestiti da un database centrale chiamato *conditions database*. Questi files contengono tutte le informazioni riguardanti la geometria del rivelatore in ogni sua parte. Un elemento che va sottolineato è che, all'interno del database, ven-

gono immagazzinati i valori che compongono la geometria nominale, questo è fondamentale in quanto la struttura del rivelatore cambia nel tempo, come ad esempio in conseguenza di variazioni dovuti a terremoti (estremamente frequenti in questa parte di mondo). Un leggero cambiamento nella geometria, porterebbe ad una ricostruzione delle tracce poco precisa e la precisione nelle ricostruzioni dei vertici di decadimento, e quindi delle tracce, è di importanza basilare. A questo scopo, all'interno delle prese dati vengono fatti dei run di allineamento, appositamente pensati per calibrare la geometria del rivelatore, che vengono riutilizzati nel momento che il software si dovrà occupare della ricostruzione delle tracce corrispondenti a quell'allineamento.

Ogni sottorivelatore ha le sue librerie per comporne la geometria, l'insieme di queste librerie è detto *Gearbox*, che è la libreria a cui l'utente fa riferimento. Una volta ricevuta la richiesta da parte dell'utente tramite il suo steering file, il gearbox costruisce quindi un oggetto usando ROOT TGeo (uno standard creato al CERN per questo genere di oggetti) in cui all'interno c'è la geometria del sottorivelatore richiesto, nel momento richiesto, questo oggetto viene quindi passato al framework che la può utilizzare per le varie ricostruzioni o simulazioni richieste.

### 2.5.3 Simulazione

Un altro aspetto di fondamentale importanza all'interno di BASF2 è la parte di simulazione, anch'essa è stata ampiamente utilizzata nell'analisi descritta nel prossimo capitolo della tesi. La simulazione dell'intero detector è basata su *Geant4* [24], uno standard utilizzato da tutta la comunità di ricerca sulla fisica delle particelle. Tuttavia, *Geant4* non è costruito per gestire i pacchetti TGeo creati da *Gearbox*, per questo motivo quindi BASF2 utilizza la libreria *G4Root*, appositamente pensata per mettere in comunicazione TGeo con *Geant4*. *Geant4* poi si occupa di tutta la simulazione del comportamento di tutte le particelle interagenti con il materiale del detector. Una volta simulata l'interazione delle particelle con la materia, questa viene passata ai singoli softwares dei sottorivelatori. Ognuno di essi quindi utilizza le informazioni di *Geant4*, per completare la simulazione dell'evento specifico di quella parte di rivelatore.

Tramite questo *tool* possiamo quindi simulare tutti gli eventi di cui abbiamo bisogno per perfezionare la nostra analisi, prima di sottometerla ai dati registrati durante la presa dati. A questo scopo, BASF2 offre all'utente tutta una serie di "generatori" specifici di alcuni tipi di eventi, come ad esempio  $B^0 - \bar{B}^0$ , o più specifici come *ParticleGun*: un generatore pensato per creare candidati di un determinato tipo di particella come fotoni o pioni ecc, *Geant4* si occuperà poi di simulare tutto l'evento partendo da quella particella madre con le sue caratteristiche cinematiche imposte. In particolare, nella preparazione dell'analisi descritta nel capitolo 3, ho fatto un ampio uso di questo specifico modulo, per poi utilizzare gli eventi Monte Carlo, molto più completi, ma che sono simulati usando sempre *Geant4*.

### 2.5.4 Ricostruzione

La ricostruzione fornisce le tracce (traiettorie delle particelle cariche), le informazioni sull'identificazione delle particelle, dei cluster di ECL e di KLM, che l'utente utilizza per formare la lista di particelle. Per prima cosa il software guarda ogni singolo sottorivelatore e ne raggruppa i segnali tra di loro vicini, li *clusterizza* appunto, in modo da rendere una eventuale traccia il più distinguibile possibile.

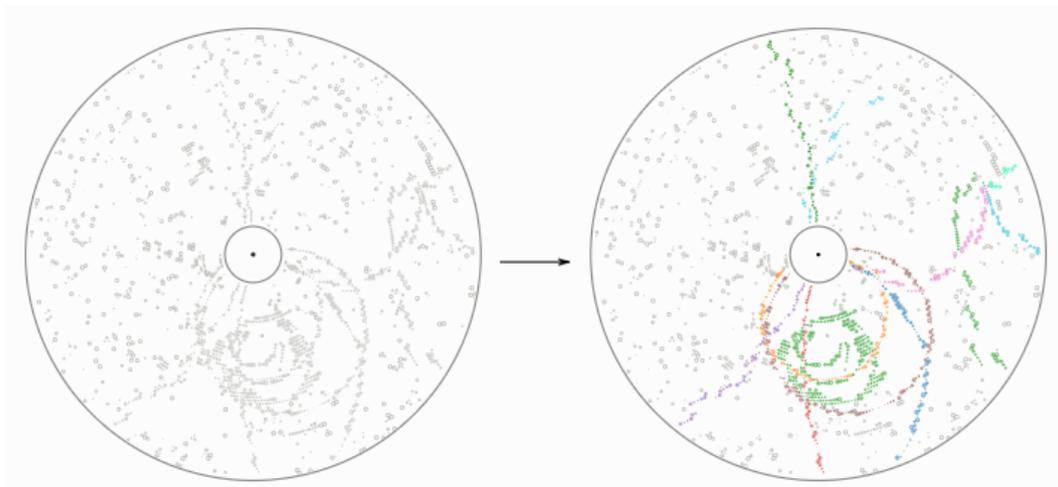


Figura 2.25: Esempio di tracking all'interno del sottorivelatore CDC. Una volta ricevute le "hits" registrate dal sottorivelatore, BASF2 trova le possibili tracce derivanti da quelle hits.

Il sistema cerca ad esempio le tracce facendo un fit tra gli andamenti trovati e le caratteristiche delle particelle, identificando quindi la particella con quella che meglio si interpola con le traiettorie trovate. Questo lavoro di ricostruzione - qui estremamente sintetizzato - richiede una elevatissima capacità di calcolo, vista la moltitudine di caratteristiche di cui l'algoritmo deve tenere conto. Per questo motivo gli istituti facenti parte della collaborazione mettono a disposizione i loro sistemi di calcolo a tutta la collaborazione, creando così un sistema chiamato *grid*, usato dalla collaborazione stessa per le simulazioni e a cui tutti possono fare richiesta di accesso e utilizzarne la capacità di calcolo per le singole analisi, in maniera gestita dalla collaborazione stessa.

### 2.5.5 Analisi

A questo punto possiamo ricostruire i nostri candidati, alla ricerca dell'evento che ci interessa, nel mio caso fotoni convertiti in coppie  $e^+e^-$ , tramite la creazione di uno steering file. Nella fig. 2.26 c'è un esempio di steering file molto rudimentale ma completo. La prima cosa da fare una volta assegnato un nome al path (nell'esempio in figura "main") è quella di caricare all'interno del programma il file con i dati da analizzare. Una volta caricato il file vengono cercate le

single particelle e ricostruito l'evento che ci interessa. A questo punto possiamo selezionare le caratteristiche che vogliamo osservare per la nostra analisi. Queste caratteristiche vengono chiamate variabili, e possono variare ad esempio dall'energia della particella richiesta o al primo layer attraversato del sottorivelatore SVD, ecc.

```
import sys
import basf2 as b2
import modularAnalysis as ma
import stdV0s
import variables.collections as vc

main = b2.Path()

ma.inputMdstList(environmentType="default", fileList=[b2.find_file("file.root", "examples")], path=main)

ma.fillParticleList("e+:uncorrected", "electronID >0.1 and dr < 0.5 and abs(dz) < 2 and thetaInCDCAcceptance", path=main)
stdV0s.stdKshorts(path=main)

ma.reconstructDecay("J/psi:ee -> e+:uncorrected e-:uncorrected", cut="dM < 0.11", path=main)

ma.reconstructDecay("B0 -> J/psi:ee K_S0:merged", cut="", path=main)

standard_vars = vc.kinematics + vc.mc_kinematics + vc.mc_truth

ma.variablesToNtuple("B0", variables=standard_vars, filename="Bd2JpsiKS.root", treename="tree", path=main)

b2.process(main)
```

Figura 2.26: In questo esempio lo steering file ricostruisce eventi  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ . Per farlo da una parte cerca tracce corrispondenti agli elettroni e positroni e con essi ricostruisce la  $J/\psi$ , dall'altra invece cerca direttamente un  $K_S^0$ , che ha un particolare sistema di ricerca. Una volta trovati questi due candidati, va a ritroso alla ricerca di un  $B^0$  decaduto in quelle due particelle. Poi assegna ad ognuna di queste particelle le variabili richieste ed infine salva tutto nel file chiamato "Bd2JpsiKS.root".

Le variabili sono salvate all'interno di una ntuple. Una ntuple altro non è che un file in formato root, al cui interno sono immagazzinati tutti i dati divisi, candidato per candidato, ed organizzati particella per particella. Ad esempio nel caso della mia analisi, ogni variabile richiesta può essere associata ad un fotone, ad un elettrone oppure ad un positrone, in modo che nel processo di osservazione e analisi delle caratteristiche richieste, queste ultime si possano distinguere più efficacemente.

### 2.5.6 Coordinate

Nel rivelatore di Belle II è convenzione utilizzare la coordinata Z corrispondente all'asse solidale alla direzione del fascio, la coordinata Y come asse verticale e la coordinata X come asse orizzontale. Il punto di origine degli assi corrisponde al punto di interazione. La coordinata R corrisponde alla distanza dall'asse Z,  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ .

Nella mia analisi utilizzerò anche le coordinate polari sferiche: l'origine rimane il punto di interazione, la coordinata  $\theta$  corrisponde all'angolo polare formato con l'asse Z ( $\theta = 0$  corrisponde alla direzione del fascio degli elettroni), la coordinata  $\phi$  a quello azimutale (l'angolo sul piano XY), mentre la distanza dall'IP

(Interaction Point) verrà identificata semplicemente con "IPdist". In particolare nella mia analisi utilizzerò convenzionalmente la coordinata  $\lambda = \pi/2 - \theta$ . La coordinata  $\lambda$  è di più facile interpretazione nei grafici, in quanto  $\lambda = 0$  corrisponde al piano XY nel punto di interazione, quindi  $\lambda > 0$  corrisponde alla parte forward del rivelatore,  $\lambda < 0$  corrisponde alla parte backward.

Infine all'interno dell'analisi proposta nel capitolo seguente verranno utilizzate anche le coordinate locali dei singoli sensori che compongono VXD. In questo caso l'origine corrisponde al punto centrale del sensore. I sensori sono parallelepipedi sottili (con misure differenti tra i sensori), la coordinata U corrisponde al lato corto del sensore (misura la coordinata  $R/\phi$ ), la coordinata V corrisponde al lato lungo (il lato con direzione parallela all'asse Z), mentre la coordinata W corrisponde al lato che ne determina lo spessore.

# Capitolo 3

## Analisi material budget VXD

In questo capitolo verrà esposta l'analisi il cui scopo è quello di valutare il materiale che compone il rivelatore di vertice di Belle II. Partendo dalle motivazioni che hanno spinto questa analisi, passerò poi all'esposizione dei dati usati. Spiegherò quindi i metodi di ricostruzione utilizzati e i criteri di selezione dei dati, che mi permetteranno di fare un confronto tra i dati di Belle II ricostruiti e gli eventi Monte Carlo prodotti.

### 3.1 Motivazioni dell'analisi

Uno degli aspetti fondamentali di un rivelatore di vertice, è conoscere approfonditamente da cosa è composto e come è composto. Conoscere la geometria di un rivelatore (intesa come la posizione e la composizione di tutte le sue parti), permette di aumentare la precisione delle analisi portate avanti dalla collaborazione. Alcune di queste analisi necessitano di una risoluzione sulla misura dell'energia depositata estremamente alta. Per questo motivo le simulazioni devono avere una geometria del rivelatore il più possibile simile alla realtà.

Per quanto ci si possa sforzare di creare una geometria del rivelatore simile a quella reale, riprodurla fedelmente è un compito molto difficile. Il material budget del rivelatore ad esempio, può essere solo calcolato, non esiste un metodo diretto di misura. I files che includono la geometria del rivelatore, immagazzinati nel database centrale di Belle II, si basano quindi sulle previsioni e sui progetti del rivelatore. L'unico modo per poter valutare quanto queste previsioni siano corrispondenti alla realtà è fare un'analisi dei dati. Partendo dai dati quindi, cercherò di migliorare la conoscenza della geometria utilizzata per le simulazioni, confrontando lo stesso tipo di eventi creati da una simulazione Monte Carlo e gli eventi raccolti durante un esperimento di Belle II. Confrontandoli cercherò eventuali discrepanze, che potranno essere corrette nella geometria del rivelatore.

#### 3.1.1 Metodo dell'analisi

Per valutare eventuali differenze tra la geometria implementata nel database del rivelatore e la geometria reale, si analizzeranno le conversioni dei fotoni all'inter-

no del rivelatore di vertice. Dal momento che i fotoni convertono solo in presenza di materiale, una concentrazione più alta di produzioni di coppie  $e^+e^-$  sarà l'indicazione della presenza di materiale. Per ricostruire l'evento  $\gamma + Z \rightarrow e^+e^- + Z$ , si andranno a cercare le tracce che sono compatibili con elettroni e positroni, provenienti da un punto comune. Questo tipo di ricostruzioni non sono tipiche a Belle II, in quanto la grandissima parte degli studi fatti parte dal presupposto che le tracce delle particelle provengano dal punto di interazione. Nel caso invece di fotoni che convertono in  $e^+e^-$  nella materia, le tracce di questi ultimi non ci si aspetta che provengano dall'IP.

Il confronto è stato fatto tra una simulazione Monte Carlo e i dati immagazzinati durante uno degli "esperimenti" di Belle II. Sono quindi state ricostruite le tracce dei candidati  $e^+$  ed  $e^-$  e trovato il loro punto di produzione, imponendo che la massa invariante dei candidati fosse zero. Qualsiasi nucleo può interagire con un fotone energetico, molecole di gas presenti nell'aria ecc. Nella sez. 3.4, i dati utilizzati sono quindi stati ottimizzati, con lo scopo di avere un confronto più affidabile.

Un taglio in energia è stato applicato allo scopo di eliminare i dati di difficile ricostruzione (sotto ai 100 MeV), oltre che per normalizzare il Monte Carlo con i dati. Partendo dall'ipotesi che la distribuzione angolare del flusso di fotoni convertiti e non convertiti sia uguale, è stato utilizzato il calorimetro ECL per ripesare il flusso di fotoni Monte Carlo su quello dei dati. Infine, è stato utilizzato uno studio sui  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , che ha evidenziato come all'allontanarsi dall'IP, l'efficienza di ricostruzione sui dati diminuisca rispetto a quella del Monte Carlo. Dal punto di vista della ricostruzione infatti, il rivelatore di vertice è cieco ai  $K_S^0$  così come lo è ai fotoni; mentre la ricostruzione delle tracce dei  $\pi$  è concettualmente uguale a quella degli  $e$ . La distribuzione dei vertici dei dati è stata infine confrontata con quella del MC in diverse variabili, ad esempio la distribuzione di  $\theta$  e la distanza dal punto di interazione.

Nelle sezioni seguenti saranno approfonditi tutti gli aspetti appena introdotti, oltre a tutti gli altri aspetti che riguardano l'analisi. Verranno quindi esposti i risultati ottenuti e ne verranno discusse le possibili cause.

## 3.2 Dataset utilizzati

L'analisi si concentra sul confronto tra dati e Monte Carlo generico (le simulazioni che hanno lo stesso tipo di eventi dei dati). Tuttavia, in preparazione all'analisi, è utile avere un campione che contenga solo fotoni. Per questo è stato usato uno dei tool di generazione offerti all'interno del framework BASF2. Questi tools di generazione sono diversificati in base alle esigenze dell'utente, e sono pensati per ricreare i candidati nella maniera più simile possibile ai dati veri. Generalmente, vengono utilizzati per ottimizzare la ricostruzione dei candidati oggetto dell'analisi. Nelle prime fasi, un dataset Monte Carlo generico può risultare eccessivamente complicato da analizzare, bisogna tenere in considerazione infatti,

che solitamente le analisi si concentrano su aspetti estremamente puntuali dei dati prodotti.

### 3.2.1 Modulo di generazione: ParticleGun

BASF2 presenta una lunga serie di moduli di generazione che, essendo specifici per eventi particolari, non sono utili al mio caso. Esiste tuttavia un modulo molto generale, chiamato **ParticleGun**, che fa al caso mio. ParticleGun è un modulo di generazione di base che simula la generazione di un tipo di particella specificato dall'utente. Essendo un generatore di eventi così basilare, bisogna impostare alcuni parametri.

La prima cosa da impostare è il tipo di particella che si vuole produrre, nel mio caso fotoni. Dopodiché si imposta il range d'impulso delle particelle generate (valore minimo e massimo) e la distribuzione che l'impulso deve avere. Nel mio caso, ho impostato un range di valori tra 0.5 GeV e 1.5 GeV, distribuiti in maniera uniforme. Questo significa che i fotoni verranno generati casualmente con un impulso compreso tra 0.5 GeV e 1.5 GeV. A questo punto vanno inseriti i parametri geometrici: ho impostato che i fotoni vengano generati tutti nel punto di interazione, distribuiti in maniera uniforme lungo tutto l'angolo solido coperto dall'accettanza del rivelatore, quindi  $-180^\circ < \phi < 180^\circ$  e  $17^\circ < \theta < 150^\circ$ . Ricapitolando quindi, ParticleGun sparerà appunto, fotoni con un impulso uniformemente distribuito compreso tra 0.5 GeV e 1.5 GeV, dal punto di interazione in direzione uniformemente distribuita, all'interno dei limiti di accettanza del rivelatore.

ParticleGun si occupa esclusivamente della generazione delle particelle. Una volta generate, viene simulata l'interazione dei fotoni con il materiale che compone il rivelatore tramite Geant4 e i softwares di simulazione dei sottorivelatori, esattamente come per il Monte Carlo generico. Infine, la simulazione viene passata ai moduli di ricostruzione che si occupano di andare ad identificare tutte le possibili tracce. Il dataset così creato viene salvato in un file root. Questo file è il posto dove il programma di analisi - lo steering file - andrà a cercare le informazioni che vengono richieste dall'utente. Dello steering file parlerò nella prossima sezione, essendo comune a tutti i dataset utilizzati.

### 3.2.2 Monte Carlo generico

I dataset Monte Carlo vengono creati tramite appositi run di calcolo in cui i server della collaborazione, per un periodo di tempo, vengono messi a disposizione degli utenti. I run Monte Carlo non hanno una frequenza precisa di produzione, anche se mediamente viene prodotto un run ogni anno. I dataset Monte Carlo, cercano di simulare più fedelmente possibile le collisioni create dall'acceleratore, per questo motivo sono simulazioni estremamente complesse che richiedono grandi capacità di calcolo. Anche per le simulazione MC si utilizza il framework BASF2.

Anche in questo caso, una volta generate, l'interazione delle particelle con la materia viene simulata utilizzando Geant4. Vengono quindi simulate le hits delle particelle nei sottorivelatori. Per questo secondo livello di simulazione vengono utilizzati software di simulazione specifici per ogni sottorivelatore, è a questo punto che vengono utilizzate le geometrie del rivelatore. Infine, i dati simulati vengono analizzati dal modulo di ricostruzione, che ricerca e ricostruisce le tracce delle varie particelle. Questi ultimi due passaggi sono la parte che richiede il maggior dispendio computazionale.

A questo punto, i dataset vengono suddivisi in base agli eventi che sono stati generati e in base alle analisi che vengono fatte tipicamente, ad esempio eventi  $c\bar{c}$ ,  $s\bar{s}$ , coppie di  $\tau^+\tau^-$  ecc. Nel mio caso, ricerco coppie  $e^+e^-$  provenienti da fotoni convertiti, che per la maggior parte delle analisi fa parte del rumore che si cerca di togliere. Quindi, tutti i dataset possono andare bene, ma non c'è un dataset specifico per il mio caso in particolare. Per fare un confronto coerente tra i dati e il MC, la scelta è ricaduta sulla tipologia di Monte Carlo simile allo skim di dati scelto (lo skim hadron). Il dataset utilizzato è stato il "type" *mixed* del run MC14ri.a, prodotto a Dicembre 2020 con la versione di BASF2 05-02-00. Il type mixed, corrisponde ad eventi  $B^0 - \bar{B}^0$ .

### 3.2.3 Dati

La presa dati di Belle II è organizzata in tre periodi per ogni anno. I dati sono ulteriormente suddivisi in sessioni chiamate "esperimenti" e gli esperimenti vengono divisi per *run*. I run sono di lunghezza variabile (max. 8 ore) e creano insiemi di dati di dimensione variabile.

I dati così raccolti vengono suddivisi in *skim* che servono per selezionare con alta efficienza gli eventi di interesse e rigettare gli altri, rendendo così più agevole l'analisi offline. Le skim vengono quindi messe a disposizione degli utenti finali che le analizzeranno nei loro lavori. La selezione dei dati grezzi è molto basilare, ad esempio vengono utilizzati criteri quali il numero di tracce, l'angolo totale tra due tracce, l'energia depositata nell'ECL ecc. Questa scelta viene fatta con lo scopo di permettere all'utente finale di avere dei dati più completi possibile, evitando di inserire errori sistematici dovuti alla selezione. D'altra parte questo implica un costo computazionale delle analisi offline più alto. Durante la raccolta dati, l'acceleratore viene fatto lavorare anche ad energie leggermente inferiori alla  $\Upsilon(4S)$ , tipicamente per studiare i fondi delle analisi dei  $B$ .

Come nel caso del Monte Carlo, non esiste una skim pensata per il mio tipo di analisi. Anche per la scelta di questo dataset, ho quindi optato per la skim che mi aspetto avere la diversificazione degli eventi più alta. La scelta è quindi ricaduta sulla skim *hadron* dell'ultimo esperimento disponibile *exp22*, la cui raccolta dati è stata fatta nell'ultimo quadrimestre 2021, all'energia della  $\Upsilon(4S)$ . La skim hadron corrisponde agli eventi che hanno almeno 3 tracce (è la skim con il numero di tracce più alto) e non ci sono tracce riconducibili ad eventi Bhabha. Una traccia ricostruita viene presa in considerazione se il suo impulso trasverso è maggiore di 0.2 GeV e se il punto della traccia più vicino all'IP è minore di 2 mm in d0 e

minore di 4 mm in  $z_0$ , dove  $d_0$  è la distanza radiale dall'IP,  $z_0$  è la corrispondente distanza lungo l'asse Z dall'IP.

### 3.3 Ricostruzione di fotoni

Il primo passo dell'analisi, è la ricostruzione dei candidati da prendere in esame. La ricostruzione avviene creando un apposito *steering file*. Uno steering file, è un programma scritto in python che, attraverso i moduli di BASF2, viene creato dall'utente finale per selezionare i candidati di interesse per l'analisi. Una volta ricostruiti i candidati utili all'evento di interesse, vengono quindi selezionate le variabili che si intende utilizzare nell'analisi.

#### 3.3.1 Moduli di ricostruzione

Il mio steering file è uguale per il dataset creato con ParticleGun e MC14ri.a. Alcune differenze sono state inserite invece nella ricostruzione dei candidati provenienti dai dati dell'exp22. Essendo dati grezzi, prima della ricostruzione dei candidati, è necessario spaccettare i dati grezzi in un formato idoneo alla ricostruzione.

##### Modulo di ricerca per $e^+e^-$

Tipicamente la prima parte dello steering file riguarda la ricerca delle particelle che andranno a creare l'evento, nel mio caso  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ . Il primo modulo che ho utilizzato è quindi **fillParticleList**. I parametri che fillParticleList richiede, sono il nome della particella da ricercare, nel mio caso  $e^+$ , ed eventuali selezioni, ad esempio tagli in energia, specifici sottorivelatori ecc; nel mio caso non sono state inserite selezioni. Nel caso di particelle cariche, fillParticleList ricerca automaticamente anche le tracce della sua antiparticella, cercare positroni o elettroni e quindi indifferente, il modulo andrà comunque a cercarli entrambi.

Lo steering file prosegue quindi con la correzione delle tracce. Utilizzando il modulo **correctBrems**, forzo BASF2 a tenere in considerazione la perdita di energia per Bremsstrahlung da parte di elettroni e positroni. A questo punto le particelle *figlie* cariche, le uniche che il rivelatore di vertice è in grado di "vedere", sono disponibili per la ricerca dei fotoni convertiti.

##### Modulo di ricerca per fotoni convertiti

Nella grandissima parte delle analisi effettuate a Belle II, le tracce delle particelle provengono dal punto d'interazione. Il software è quindi ottimizzato per la ricostruzione di questo tipo di tracce. Nel mio caso invece, le tracce degli elettroni e dei positroni, non mi aspetto che arrivino dall'IP. Mi aspetto invece che un fotone, non rivelabile da VXD, viaggi per una certa distanza e poi, interagendo con il materiale del rivelatore, converta in una coppia  $e^+e^-$ . A questo scopo è stato creato un modulo apposito, chiamato **fillConvertedPhotonList**.

`fillConvertedPhotonList`, utilizza il modulo **V0**, lo stesso modulo usato per le ricostruzioni dei  $K_S^0$  e dei  $\Lambda^0$ . Grazie a questo modulo, BASF2 cerca le coppie di tracce corrispondenti ad  $e^+$  o  $e^-$ , che vengono create in un punto comune, o comunque sufficientemente vicine da essere considerate un punto comune.

L'ipotesi di inizio traccia nell'IP, aumenta notevolmente la precisione. Quasi tutte le analisi infatti utilizzano questa ipotesi, che contribuisce a rendere la risoluzione di vertice di Belle II dell'ordine di poche decine di  $\mu\text{m}$ . Il fatto di non poterla usare, come nel mio caso, peggiora sensibilmente la risoluzione di vertice (proporzionalmente alla distanza dall'IP), anche se una valutazione della risoluzione per questi casi, non è ancora stata fatta.

### Modulo **TreeFitter**

Il passaggio successivo nel mio steering file, è quello di ricercare il vertice di decadimento. A questo scopo, BASF2 mette a disposizione il modulo **treeFitter**. Questo modulo viene largamente utilizzato nelle analisi di Belle II e permette di fittare i vertici di una catena di decadimento. Inserendo il nome della particella madre, `treeFitter` fitta le tracce che vanno a formare l'albero di decadimento (per questo motivo è stato chiamato `treeFitter`) e restituisce le posizioni dei vertici in cui avvengono i decadimenti. Nel mio caso l'unico vertice è quello in cui i fotoni convertono in coppie  $e^+e^-$ .

Per aumentare la precisione del fit, il modulo permette di inserire dei vincoli. Nel mio caso impongo:

- La massa invariante della particella madre, che essendo un fotone è quindi zero.
- Tolgo il vincolo che il primo vertice di decadimento sia nell'IP, valore che di default è impostato come *true*.

Viene quindi eseguito il fit con un *confidence level* minimo di 0.01.

### Modulo di ricerca per fotoni non convertiti

Durante l'analisi ho utilizzato anche i fotoni non convertiti, tramite l'ECL. In BASF2 esiste un modulo apposito per la ricerca di fotoni non convertiti chiamato **stdPhotons**. Anche in questo caso non ho eseguito tagli per la ricerca di questi fotoni.

Infine, nell'analisi degli eventi **simulati**, utilizzando il modulo **matchMC-Truth**, richiedo che BASF2 faccia un confronto tra candidati ricostruiti ed eventi generati. Questo modulo calcola una serie di variabili che permettono di capire se i candidati ricostruiti erano effettivamente stati generati, o se provengono da errori di ricostruzione.

## 3.4 Criteri di ottimizzazione

A ricostruzione avvenuta, tutte le variabili dei candidati richieste dall'utente vengono immagazzinate in un file root chiamato `ntupla`. L'analisi prosegue quindi nella valutazione delle distribuzioni di queste variabili.

Per poter confrontare le variabili dei candidati provenienti da dataset differenti, è necessario rendere queste distribuzioni confrontabili. Gli eventi simulati potrebbero avere impostazioni che rendono le distribuzioni delle variabili differenti rispetto a quelle dei dati, andando così a influenzare i risultati del confronto. Sono quindi state individuate tre caratteristiche che, se differenti, possono andare ad influenzare i risultati finali:

**Energia dei fotoni:** la distribuzione in energia dei fotoni potrebbe dover essere riscalata, la questione verrà affrontata specificatamente alla sezione 3.4.1.

**Distribuzione angolare fotoni:** i flussi di fotoni dei dati e del Monte Carlo, essendo differenti, potrebbero emulare un diverso material budget.

**Efficienza di ricostruzione:** l'efficienza è diversa tra i dati e il MC, questo potrebbe emulare un diverso material budget.

Allo scopo di diminuire gli errori sistematici nel confronto del material budget di VXD tra dati e MC, queste caratteristiche sono state quindi valutate e i risultati sono presentati nelle sezioni seguenti.

Il primo strato di materiale che i fotoni incontrano è la beam-pipe. La beam-pipe però non fa parte del mio studio, per questo motivo i risultati mostrati d'ora in avanti si riferiscono alle coppie prodotte fuori dalla beam-pipe (di raggio 1 cm).

### 3.4.1 Energia

La prima osservabile che ho preso in considerazione è l'energia dei fotoni convertiti. La sezione d'urto della produzione di coppie da parte dei fotoni interagenti con la materia non è dipendente dall'energia dei fotoni (nella sezione 1.2.1 è stato approfondito il discorso). Tuttavia, a basse energie, la formula presentata nella sez. 1.2.1 diventa un'approssimazione meno affidabile. Per questo motivo quindi, ho deciso di effettuare un taglio, che selezionasse solo i dati con valori di  $E_\gamma > 0.1$  GeV, per entrambe le distribuzioni. Come mostrato nel grafico in fig. 3.1, la distribuzione in energia dei fotoni convertiti non è uguale tra MC e dati.

Alla fine della sezione 1.2.1, viene mostrato come la sezione d'urto non sia costante quando l'elettrone (o il positrone) ricevono una frazione di energia dal fotone madre, vicina a 0 o a 1, nel sistema di riferimento del laboratorio. Ho quindi analizzato la distribuzione di  $x = E_-/E_\gamma$ , dove  $E_-$  è l'energia dell'elettrone e  $E_\gamma$  è l'energia del fotone incidente. I risultati sono mostrati in fig. 3.2. Il grafico mostra come in entrambe le distribuzioni, i bin vicino a  $x = 1$  siano quasi vuoti. Nella distribuzione MC invece, i bin vicino a  $x = 0$  hanno un picco che potrebbe creare delle differenze nei risultati. Al momento però non applico

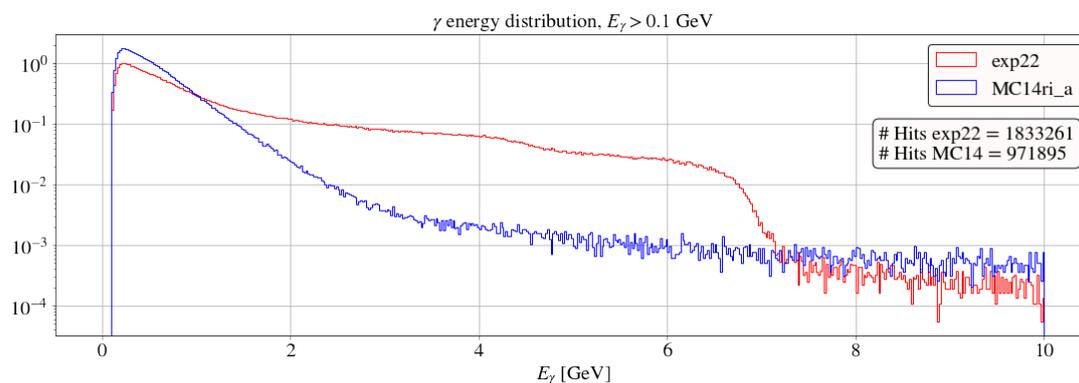


Figura 3.1: Distribuzione dell'energia dei fotoni convertiti provenienti dai dati e dal MC. Scala logaritmica. Istogramma normalizzato in area.

ulteriori selezioni, come vedremo nelle sezioni successive infatti, i tagli effettuati elimineranno questo problema.

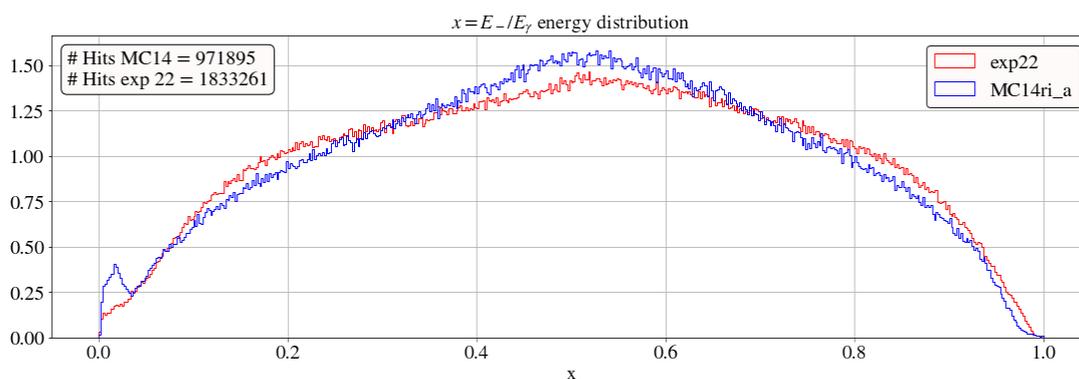


Figura 3.2: Distribuzione del rapporto tra l'energia degli elettroni e l'energia dei fotoni incidenti, nel sistema di riferimento del laboratorio. Anche in questo caso i dati sono selezionati con  $E_\gamma > 0.1$  GeV. Istogramma normalizzato in area.

### 3.4.2 Distribuzione angolare del flusso

La seconda caratteristica che potrebbe influenzare i risultati finali, è la distribuzione angolare del flusso. La distribuzione geometrica del flusso dei fotoni nella simulazione MC non rispecchia perfettamente quella dei dati. È quindi necessario ripesare le distribuzioni in  $\theta$  e  $\phi$  del MC per renderla coerente con quella dei dati. Per farlo ho utilizzato i fotoni non convertiti ricostruiti nell'ECL.

#### Energia fotoni non convertiti

Prima della distribuzione angolare del flusso di fotoni non convertiti ricostruiti tramite l'ECL, ho guardato la loro distribuzione in energia.

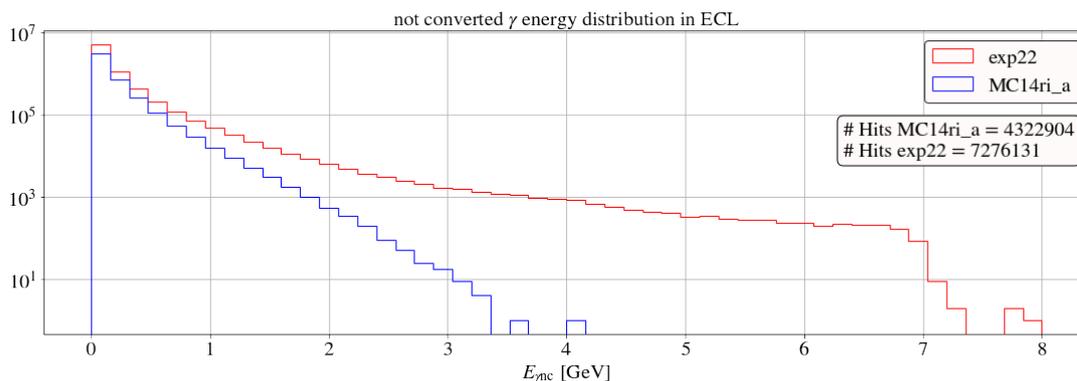


Figura 3.3: Distribuzione dell'energia dei fotoni non convertiti nell'ECL. Scala logaritmica. Istogramma normalizzato in area.

Come mostrato nel grafico in fig. 3.3, i fotoni oltre i 3 GeV rappresentano la coda della distribuzione. Per questo motivo ho deciso di selezionare solo i dati con  $E_{\gamma_{nc}} < 1.5$  GeV, così da avere due distribuzioni senza code e più simili tra loro. Per mantenere la coerenza, questa selezione in energia deve quindi essere applicata anche ai fotoni convertiti. Le nuove distribuzioni delle energie, sono mostrate in fig. 3.4.

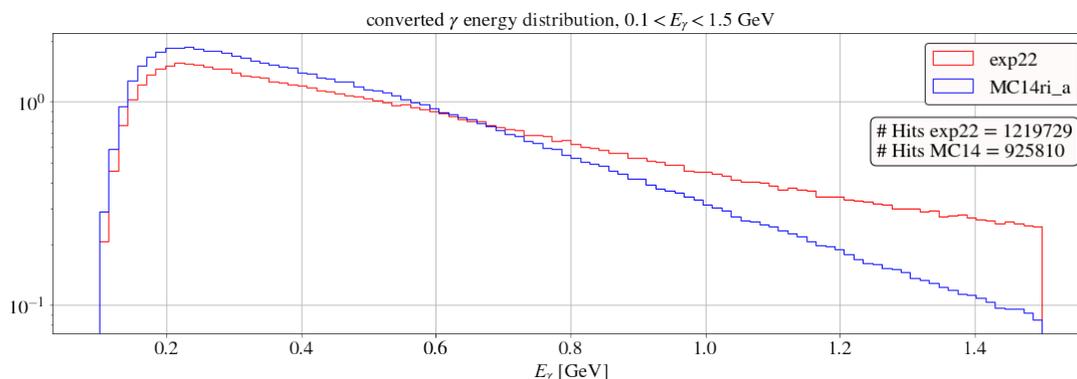


Figura 3.4: Distribuzione dell'energia dei fotoni convertiti, la selezione in  $E_{\gamma}$  è tra 0.1 GeV e 1.5 GeV. Scala logaritmica. Istogramma normalizzato in area.

Il grafico in fig. 3.5, mostra come il picco vicino ad  $x = 0$  sia stato eliminato dal taglio delle energie superiori a 1.5 GeV e come l'accordo tra dati e MC sia migliorato.

### Selezione dei fotoni provenienti dall'IP

I fotoni sono una delle principali fonti di background proveniente dall'acceleratore. Il fondo macchina presente nel rivelatore di vertice VXD è diverso rispetto a quello presente nell'ECL. Essendo VXD molto più vicino alla regione di interazione, è più soggetto a background e quindi viene investito da un flusso di

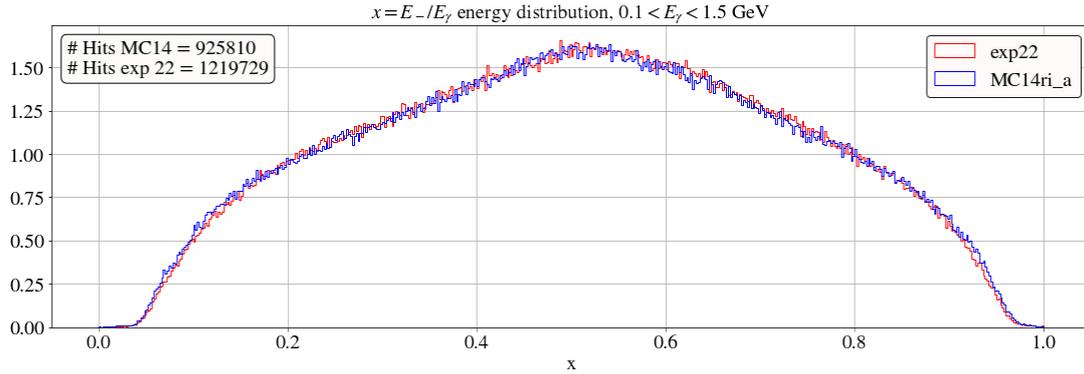


Figura 3.5: Distribuzione del rapporto tra l'energia degli elettroni e l'energia dei fotoni madre convertiti. Istogramma normalizzato in area.

fotoni non provenienti dall'IP, come quelli dovuti alla radiazione di sincrotrone. Per ovviare a questo problema ho quindi selezionato i soli fotoni provenienti dal punto di interazione.

Per selezionare i soli fotoni provenienti dall'IP ho calcolato la direzione dell'impulso di questi ultimi nella loro coordinata  $\lambda_p$ . Ho quindi confrontato la direzione dell'impulso con la coordinata  $\lambda_{\text{vtx}}$  del vertice di produzione delle coppie  $e^+e^-$ . Quando un fotone proviene dall'IP, la direzione polare del suo impulso  $\lambda_p$  deve essere uguale all'angolo  $\lambda_{\text{vtx}}$  del suo vertice di produzione. Lo stesso concetto è stato applicato all'angolo  $\phi$ . Ho quindi calcolato la differenza tra l'angolo della direzione dell'impulso e quello del vertice di produzione degli  $e^+e^-$ .

I risultati mostrati in fig. 3.6, mostrano come la gran parte dei fotoni provengano dall'IP. Da questo grafico si nota come la distribuzione del MC sia più concentrata nel centro del grafico, questo indica che il fondo macchina dei fotoni non provenienti dall'IP sia probabilmente sottostimato nelle simulazioni. L'elefante nella stanza è però rappresentato dalle due strisce orizzontali, che indicano un accumulo di entrate a  $\phi = +\pi$  e  $\phi = -\pi$  in entrambe le distribuzioni.

L'accumulo di residui a  $\phi = \pm\pi$ , indica che il software sbaglia di esattamente  $\pi$ , ad assegnare la direzione dell'impulso nell'angolo  $\phi_p$ . BASF2 calcola l'impulso dei fotoni a partire dall'impulso degli  $e^+$  ed  $e^-$  figli. La spiegazione più convincente a questo fenomeno è che sotto certe condizioni, non ancora chiarite, il software inverte il valore della carica delle particelle provenienti dal vertice di produzione. Un'inversione della carica, positiva per l'elettrone e negativa per il positrone, ricostruirebbe quindi la direzione dell'impulso del fotone con verso opposto: con una differenza di  $\pi$  tra  $\phi_p$  dell'impulso e  $\phi_{\text{vtx}}$  del vertice. Chiarire le motivazioni che creano questi errori nel tracking è di fondamentale importanza per le analisi di Belle II; alcuni studi a riguardo sono già cominciati. Nella mia analisi, sono tuttavia costretto a superare il problema senza approfondirlo ulteriormente.

L'accumulo di dati in  $[(\lambda_p - \lambda_{\text{vtx}}) = 0, (\phi_p - \phi_{\text{vtx}}) = \pm 2\pi]$  non è invece allarmante. Essendo  $\phi$  un angolo giro compreso tra  $-\pi < \phi < \pi$ , le differenze di poco inferiori (superiori) a  $2\pi$  ( $-2\pi$ ), si trovano quando il vertice di produzione

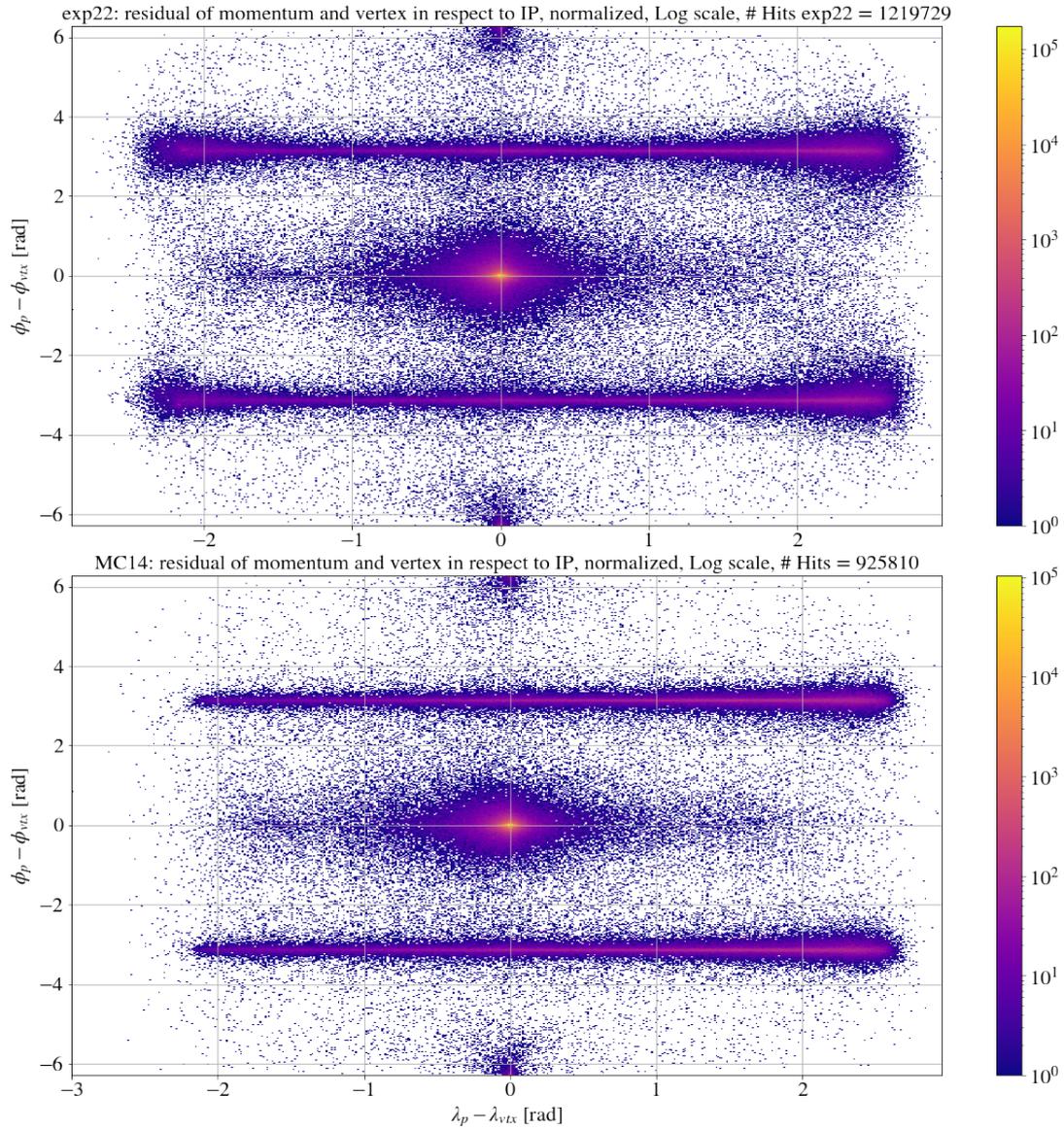


Figura 3.6: Residui tra l'angolo della direzione dell'impulso dei fotoni e l'angolo del vertice di produzione delle coppie  $e^+e^-$ . Sull'asse y la distribuzione dei residui in  $\phi$ , sull'asse x la distribuzione dei residui in  $\lambda$ . La scala dell'asse z è logaritmica. In alto i dati, in basso il MC.

delle coppie è di poco superiore a  $\phi_{\text{vtx}} = -\pi$ , mentre l'impulso è di poco inferiore  $\phi_p = \pi$ . Una differenza del genere è di circa  $2\pi$ , nonostante l'angolo del vertice e dell'impulso sia simile. Lo stesso ragionamento, al contrario, spiega le differenze di  $-2\pi$ .

Faccio quindi una selezione dei fotoni provenienti solamente dal punto di interazione, tenendo le sole entrate nell'intorno di zero della distribuzione dei residui. In particolare, vengono selezionati i candidati che rientrano nell'intervallo dei residui  $-0.09 < (\lambda_p - \lambda_{\text{vtx}}) < 0.09$  e  $-0.09 < (\phi_p - \phi_{\text{vtx}}) < 0.09$  ( $0.09\text{rad} = 5.16^\circ$ ). La scelta di  $0.09$  rad mi è sembrata il giusto compromesso tra la riduzione della statistica e l'allineamento tra impulso e vertice. In questo modo evito il problema del verso dell'impulso in  $\phi$  e rendo coerente l'utilizzo dei pesi calcolati con l'ECL.

### Distribuzione angolare fotoni non convertiti

Ho quindi analizzato la distribuzione angolare del flusso dei fotoni non convertiti nell'ECL cercando eventuali differenze negli angoli polare e azimutale della distribuzione  $\theta$  e  $\phi$ .

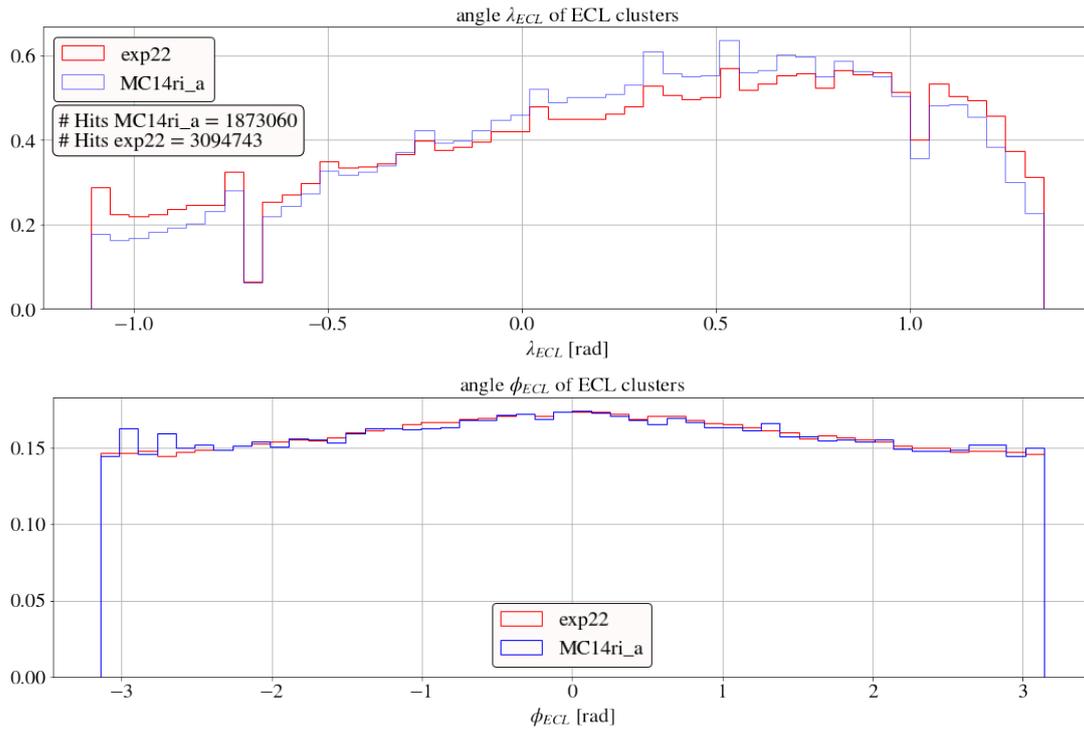


Figura 3.7: In alto la distribuzione del flusso di fotoni non convertiti nell'ECL nell'angolo  $\lambda$ . In basso la distribuzione dei fotoni non convertiti nell'angolo  $\phi$ . Entrambi gli istogrammi sono normalizzati in area. I due buchi nella distribuzione in  $\lambda$  sono dovuti ai gaps tra la parte barrel e le due parti forward e backward di ECL (vedi sez. 2.3.3).

Gli istogrammi mostrati in fig. 3.7 mostrano come le due distribuzioni in  $\phi$  tra MC e dati siano abbastanza compatibili. Le due distribuzioni nell'angolo

$\lambda$  invece hanno delle differenze sensibili, ho quindi riscalato i dati dei fotoni convertiti nella variabile  $\lambda$ . Il rapporto, bin per bin mostrato in fig. 3.6, tra la distribuzione dei dati e del MC è stato utilizzato per riscalare il MC, così da normalizzare la distribuzione angolare del flusso di fotoni.

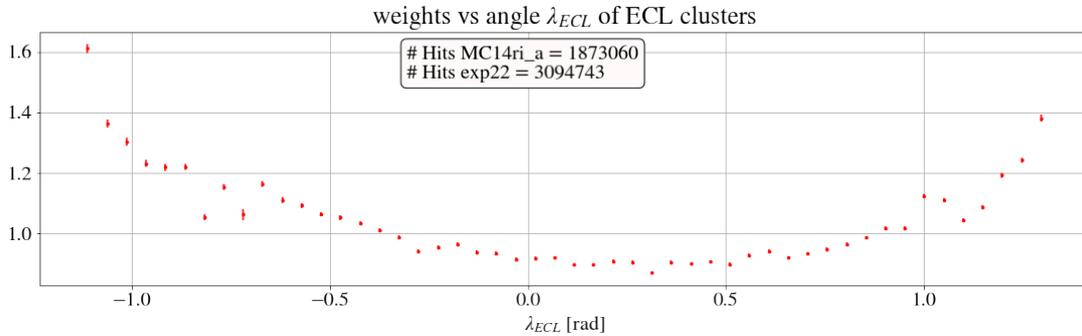


Figura 3.8: Distribuzione bin per bin del rapporto tra la distribuzione nell'angolo  $\lambda$  dei dati e del MC. L'errore è statistico ed è calcolato dalla popolazione di ogni bin.

### 3.4.3 Efficienza di ricostruzione dati e MC

Infine, l'ultima caratteristica da prendere in considerazione, è la differenza nell'efficienza di ricostruzione tra i dati e il MC. Uno studio interno a Belle II, mostrato in fig. 3.9, ha dimostrato che l'efficienza di ricostruzione per le tracce delle particelle non generate nel punto di interazione non sia uguale per i dati e per il MC.

Lo studio degli eventi  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  ha dimostrato come, all'aumentare della distanza dall'IP, l'efficienza di ricostruzione dei  $K_S^0$  dei dati cali rispetto a quella del MC in maniera lineare.

Dal punto di vista della tracciatura, la ricostruzione di un evento  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  è molto simile alla ricostruzione di un evento  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ . In Belle II uno studio simile, specifico per i fotoni convertiti, non è stato ancora realizzato. Come nel caso della geometria del flusso di fotoni, ho quindi utilizzato i valori mostrati in fig. 3.9 per riscalare i risultati della mia ricostruzione. I dati sono quindi stati ripesati tenendo conto dell'efficienza di ricostruzione.

A questo punto, le distribuzioni dei dati e del MC di fotoni convertiti in coppie  $e^+e^-$  sono state corrette, eliminando quelli che potevano essere i bias di partenza. Nella sezione successiva vengono mostrati e discussi i risultati dell'analisi.

## 3.5 Confronto dati - Monte Carlo

I risultati delle ricostruzioni di fotoni convertiti in coppie  $e^+e^-$  sono stati analizzati in tre modi differenti. Una prima osservazione è stata fatta valutando la distribuzione dei vertici di produzione nelle coordinate X,Y e Z,R. Sono quindi

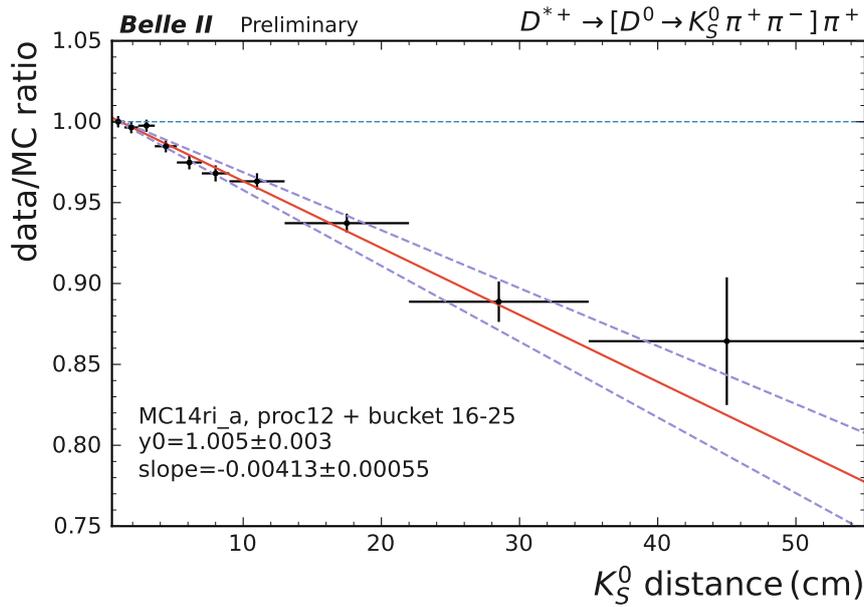


Figura 3.9: Rapporto tra l'efficienza di ricostruzione dei  $K_S^0$  dei dati e del MC, in funzione della distanza dal punto di interazione. La ricostruzione dei  $K_S^0$  viene effettuata partendo dalle tracce dei  $\pi^+\pi^-$  figli. Studio interno alla collaborazione.

state valutate le distribuzioni dei vertici sensore per sensore ed infine sono state analizzate e confrontate le singole coordinate.

### 3.5.1 Radiografia di VXD

Per avere un primo riscontro visivo, ho deciso di valutare la distribuzione spaziale dei vertici di produzione degli  $e^+e^-$ . Come variabili ho quindi scelto i vertici generati dalla simulazione Monte Carlo. I vertici generati corrispondono quindi a ciò che la simulazione crea, non a quello che il software di ricostruzione costruisce. Le tracce simulate sono quindi esenti da errori, così come la posizione del vertice. Il risultato è tuttavia interessante, perché in due semplici grafici sono contenute tutte le informazioni sulla geometria simulata del rivelatore.

I grafici in fig. 3.10 mostrano come la simulazione MC14ri\_a distribuisca i vertici di interazione dei fotoni con la geometria della simulazione. In questo caso, i criteri di selezione spiegati nella sezione precedente non sono stati applicati. Questo primo grafico mostra anche come la simulazione tenga in considerazione le differenti tipologie di materiale, come per le aste in carbonio di supporto ai ladder (per aumentarne la rigidità) ad esempio: essendo in fibra di carbonio, la loro densità è più bassa rispetto ai sensori, oltre che coprire uno spazio minore, la probabilità di interazione è quindi più bassa; il risultato è che nei grafici quasi non si vedono. Dagli istogrammi potrebbe sembrare che alcuni vertici di produzione si presentino negli spazi vuoti del rivelatore (come ad esempio tra il layer 1 e il layer 2), in realtà, essendo proiezioni, i vertici provengono dalle interazioni dei fotoni con le strutture del rivelatore che stanno al di fuori della regione di accettazione.

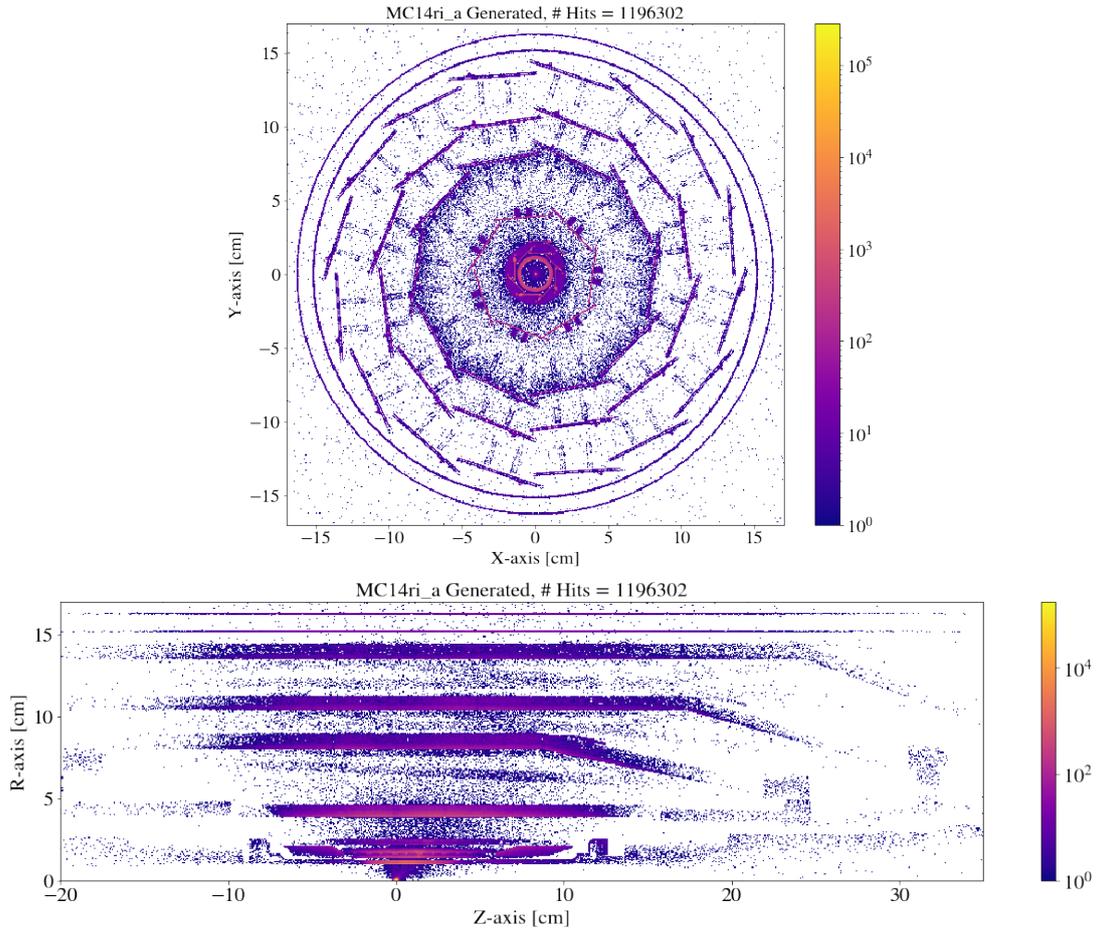


Figura 3.10: Istogramma 3D, ogni entrata rappresenta un vertice di produzione di coppia  $e^+e^-$  preso dalle "verità" Monte Carlo. Scala logaritmica in Z. In alto la distribuzione delle coordinate X,Y dei vertici. In basso la distribuzione delle coordinate Z,R dei vertici, dove  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ .

Infine, i due grafici mostrano che la ricostruzione dei candidati tramite lo steering file è andata a buon fine. Ho quindi continuato l'analisi con i dati ricostruiti.

Purtroppo, il processo di ricostruzione porta con sé tutta una serie di incertezze sperimentali. Il software infatti conosce solo il pixel, o la strip, che si sono accesi a causa dell'interazione con gli  $e^+$  o  $e^-$ , senza sapere quindi la posizione esatta in cui è passata la particella. Utilizzando le informazioni provenienti dalle varie hits, BASF2 ricostruisce le tracce ed andando a ritroso in esse arriva al vertice di produzione.

Una prima radiografia del rivelatore tramite i processi di interazione dei fotoni con la materia è quindi stata fatta confrontando le distribuzioni dei dati e del MC. Da questo punto in poi - salvo diversamente specificato - in cui vengono confrontati i dati e il MC e in cui i candidati sono ricostruiti, sono stati applicati tutti i criteri di ripesamento presentati nella sezione precedente.

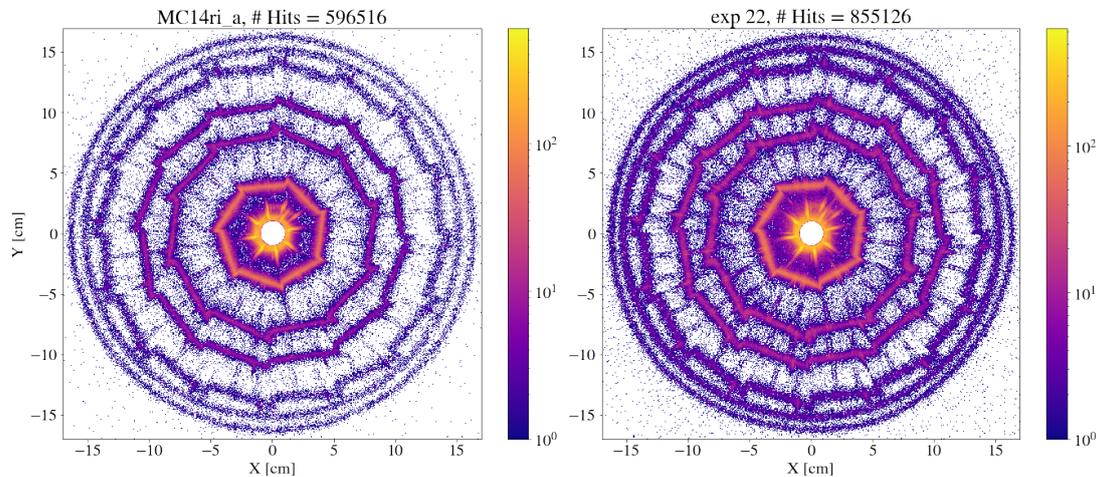


Figura 3.11: Istogramma 3D, ogni entrata rappresenta un vertice ricostruito di produzione di coppia  $e^+e^-$ . Scala logaritmica in Z. A sinistra la distribuzione delle coordinate X,Y dei vertici del MC. A destra la distribuzione delle coordinate X,Y dei vertici dei dati.

Gli istogrammi mostrati in fig. 3.11 rappresentano le distribuzioni in X,Y dei vertici di produzione di coppie. La figura evidenzia come la risoluzione sia più bassa rispetto ai candidati generati della fig. 3.10, come aspettato. I grafici mostrano inoltre come la distribuzione del MC tenda ad accumulare più vertici nei layers più interni di VXD e meno all'esterno. Anche nella distribuzione dei dati i vertici si accumulano maggiormente nei layers interni, tuttavia in questo secondo caso la distribuzione è più uniforme tra layers interni ed esterni.

Gli istogrammi mostrati in fig. 3.12 rappresentano le distribuzioni in Z,R. Anche questo grafico evidenzia come la distribuzione sia più concentrata nei layers interni nel MC rispetto ai dati. Ai limiti della regione di accettazione è anche presente nei dati un accumulo di maggiore rispetto al MC. Questi differenti accumuli potrebbero essere dati da una possibile differenza nel material budget della geometria di simulazione rispetto alla geometria reale. I vertici fuori dalla

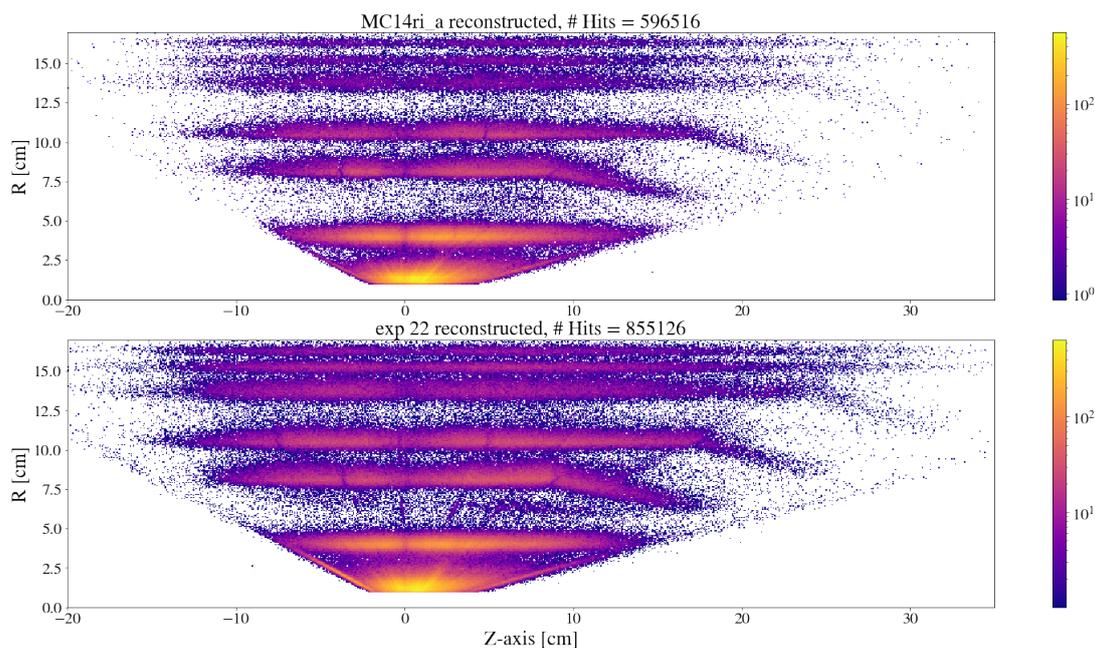


Figura 3.12: Istogramma 3D, ogni entries rappresenta un vertice di produzione di coppia  $e^+e^-$ . Scala logaritmica in Z. In alto la distribuzione delle coordinate Z,R dei vertici del MC. In basso la distribuzione delle coordinate Z,R dei vertici dei dati.

regione di accettazione di VXD, presenti nel secondo grafico della fig. 3.10, sono state eliminate dai criteri di selezione (in appendice è mostrato lo stesso grafico senza i criteri di selezione applicati 6.1).

Già da questa prima valutazione si evidenziano alcune discrepanze tra le due distribuzioni. Ho approfondito quindi l'analisi alla ricerca di eventuali differenze tra i layers e tra i sensori.

### 3.5.2 Confronto layers e sensori dati-MC

Le variabili spaziali che BASF2 mette a disposizione sono globali. Questo significa che per ogni vertice di produzione sono disponibili solo la sua posizione globale in X, Y o Z. Non ho quindi a disposizione la sua posizione rispetto al sensore, rispetto al modulo o rispetto al layer.

Per confrontare layers e sensori tra dati e MC ho quindi modificato il software di BASF2. Per creare le variabili necessarie al mio studio, ho modificato il modulo in C++ al cui interno vengono definite le variabili del rivelatore di vertice. Utilizzando le variabili globali, sfrutto una funzione che prende come parametro un vettore di coordinate (X,Y,Z) e il numero di un sensore, valuta se quella posizione è all'interno o all'esterno del sensore richiesto e restituisce un valore booleano. Ho quindi creato una funzione che, con un loop su tutti i sensori di VXD, restituisce il valore del sensore, del modulo e del layer a cui corrisponde il vertice di produzione. La funzione così creata ha una tolleranza di 1 mm.

Questa tolleranza è necessaria per la risoluzione finita dei vertici ricostruiti. Una tolleranza maggiore aumenterebbe la statistica, ma creerebbe delle ambiguità nell'assegnazione del sensore corretto nelle zone di overlap tra i sensori. Tutti i vertici che sono stati ricostruiti ad una distanza maggiore di 1 mm da un sensore vengono quindi scartati.

In SVD i sensori barrel sono uguali tra di loro. Quindi i sensori 2,3 e 4 del layer 6 di SVD sono tra di loro uguali, così come i sensori 2 e 3 del layer 5. I sensori barrel hanno gli APV25 (i chip di lettura di SVD) installati direttamente sul layer tramite un flex chiamato origami. I sensori backward e forward hanno invece un circuito flex, chiamato hybrid, che collega gli APV25 installati all'esterno della regione di tracciatura. In fig. 3.13 è mostrata una foto che rappresenta questo concetto.

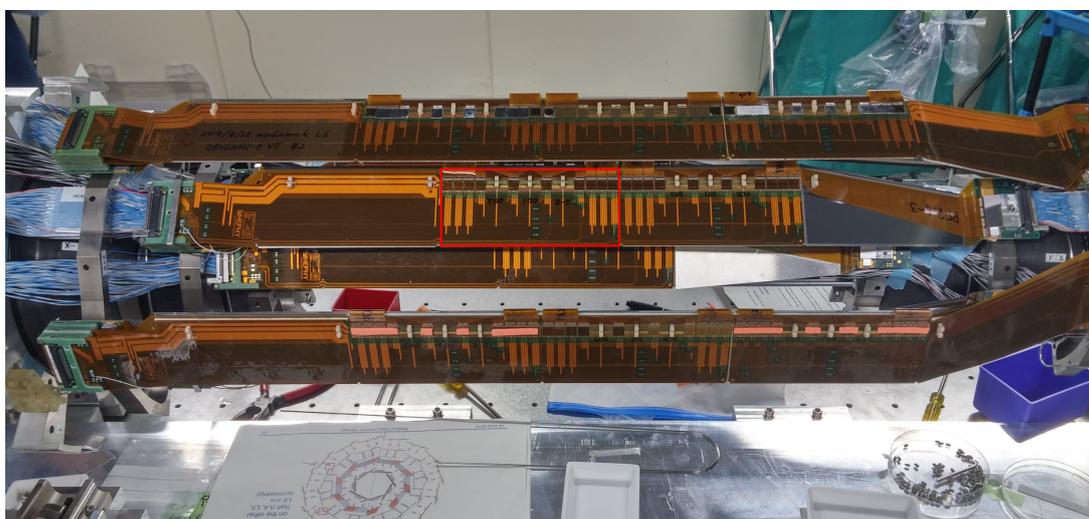


Figura 3.13: Moduli di SVD durante l'installazione. I sensori barrel (uno dei quali evidenziato dal rettangolo rosso) hanno gli APV25 installati sul sensore, i sensori forward e backward li hanno installati esternamente al modulo.

Durante il confronto delle distribuzioni tra i dati e il MC dei singoli sensori, i grafici hanno mostrato alcune differenze. In fig. 3.15 è mostrato come ci sia una tendenza nella distribuzione del MC a creare meno vertici nelle zone corrispondenti agli APV25 (tra -1 cm e -2 cm rispetto all'origine dell'asse U), rispetto ai dati. Questa tendenza è presente anche nei sensori barrel dei layer 4 e 5 (i grafici sono riportati in appendice, fig. 6.2 e fig. 6.3). Questo evidenzia una probabile sottostima del material budget degli APV25 nella geometria del MC.

Nel layer 2 di PXD, mostrato in fig. 3.14, ho inoltre notato un accumulo di vertici alle estremità del sensore backward, maggiore nei dati rispetto al MC. Essendo i chip di PXD esterni ai sensori, la causa di questo accumulo di entrate nell'istogramma, non è ancora stata identificata. Gli altri sensori non hanno evidenziato differenze particolari.

La versione di BASF2 modificata da me non è ancora presente nella repository di Belle II, tutti i dati sono quindi stati raccolti facendo girare localmente il

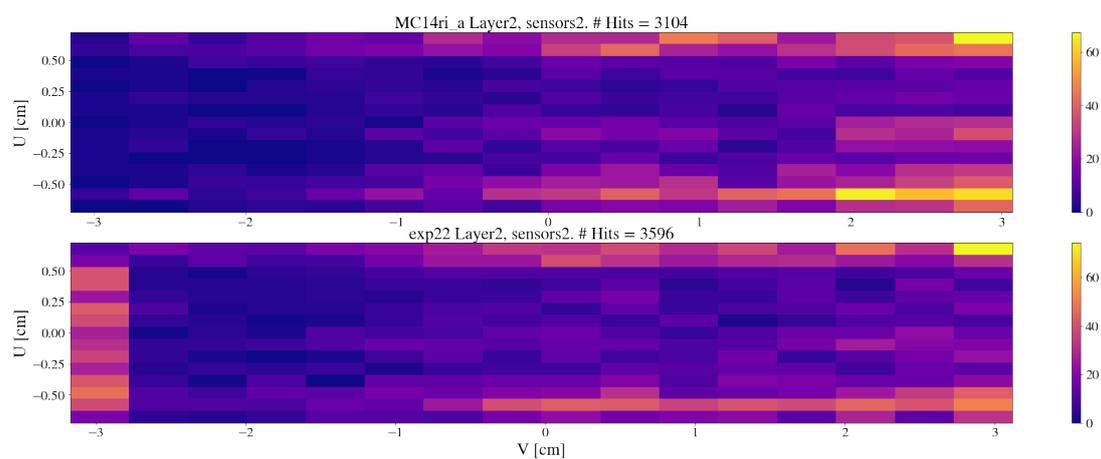


Figura 3.14: Distribuzione dei vertici nel sensore backward del layer2 di PXD. U e V corrispondono alle coordinate locali dei sensori.

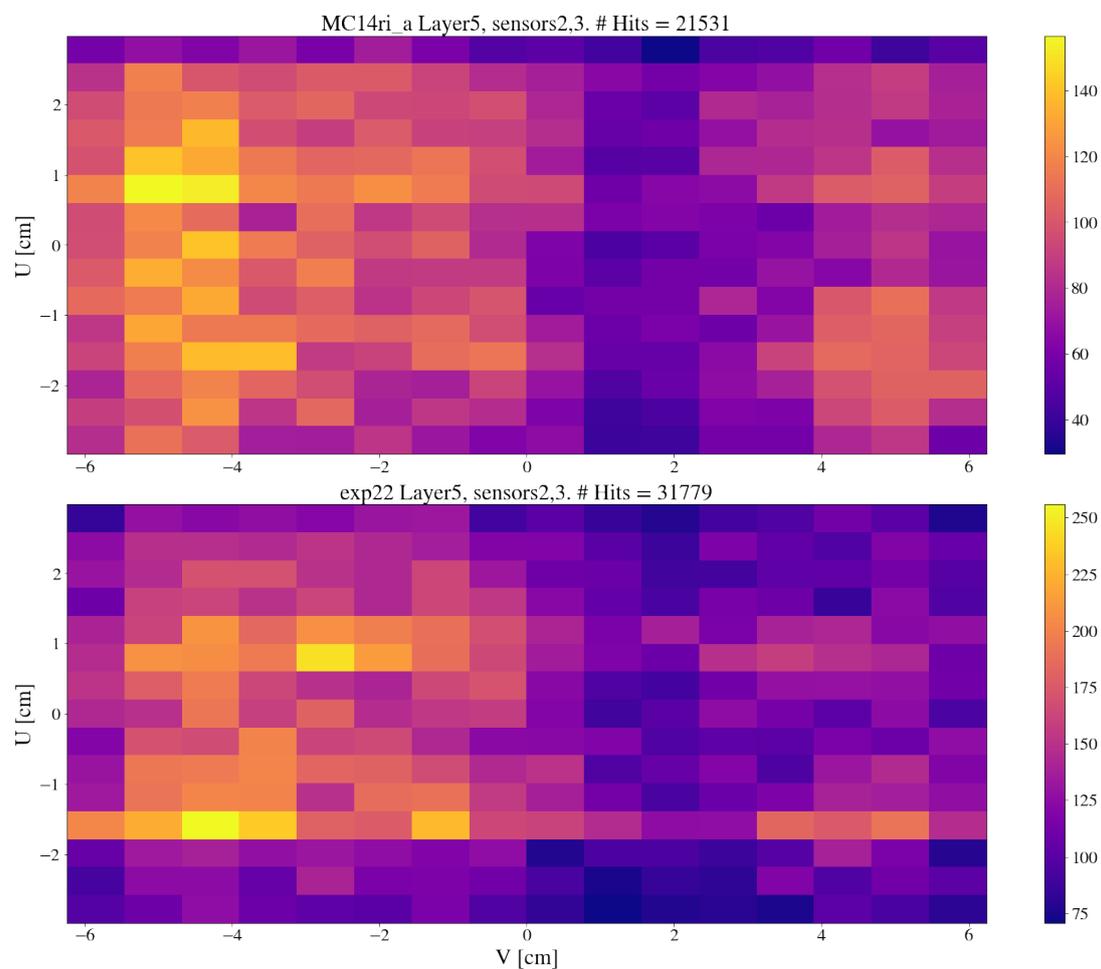


Figura 3.15: Distribuzione dei vertici nei sensori barrel del layer5 di SVD. U e V corrispondono alle coordinate locali dei sensori.

programma. Essendo il costo computazionale dell'analisi elevato, la statistica non è quindi sufficiente ad approfondire ulteriormente l'analisi nelle variabili locali delle distribuzioni tra dati e MC. A questo punto, ho quindi cercato di quantificare le differenze andando ad analizzare le singole coordinate globali di VXD, dove la statistica permette un ulteriore approfondimento.

### 3.5.3 Distribuzione delle singole coordinate

Ho quindi valutato le distribuzioni delle coordinate polari sferiche. Anche in questo caso, tutte le distribuzioni sono state valutate dopo aver applicato i criteri di ripesamento spiegati nella sezione 3.4.

Gli errori delle distribuzioni mostrate in questa sezione, sono stati calcolati utilizzando la seguente formula:

$$\sigma = \left[ \left( \frac{\sqrt{n_{\text{bin}}}}{n_{\text{tot}}} \right)^2 + \sigma_{\text{sel}}^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

dove  $n_{\text{bin}}$  corrisponde alla quantità di entrate corrispondente al bin n-esimo,  $n_{\text{tot}}$  corrisponde alle entrate totali della distribuzione, mentre  $\sigma_{\text{sel}}$  corrisponde all'errore proveniente dai criteri di ripesamento. Nel caso del MC  $\sigma_{\text{sel}}$  corrisponde agli errori della distribuzione dei pesi mostrati in fig. 3.8, per i dati  $\sigma_{\text{sel}}$  corrisponde agli errori mostrati nel grafico 3.9.

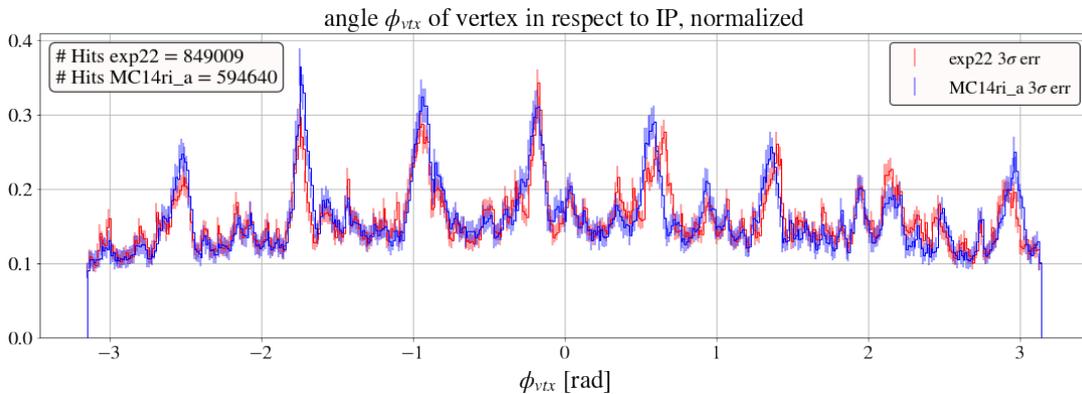


Figura 3.16: Distribuzione della coordinata  $\phi_{vtx}$  per i dati e per il Monte Carlo. Istogramma normalizzato in area. Gli errori sono calcolati a partire dalla statistica dell'istogramma e dagli errori del ripesamento per l'efficienza e del flusso.

La prima coordinata di cui è stata analizzata la distribuzione è quella dell'angolo  $\phi_{vtx}$ , mostrata in fig. 3.16. Come si può vedere dall'istogramma, il material budget della geometria di simulazione non sembra differire in maniera significativa da quello reale. Ci sono tuttavia alcune considerazioni da fare. I picchi nella distribuzione corrispondono alle regioni di overlap tra i moduli. Dal grafico sembra che il MC non sia perfettamente allineato con i dati lungo tutta la sua distribuzione. Se nella regione in cui  $\phi_{vtx} < 0$  le distribuzioni sembrano allineate, nelle regioni  $\phi_{vtx} > 0$  sembrano invece differire in maniera più marcata. La causa

è dovuta al disallineamento del MC con un errore su  $\phi$  in alcuni moduli, rispetto a quella reale.

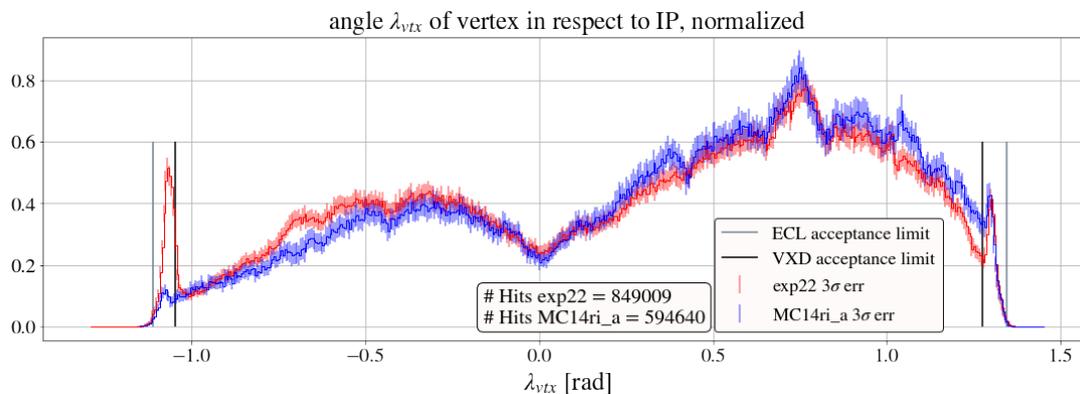


Figura 3.17: Distribuzione della coordinata  $\lambda_{vtx}$  per i dati e per il Monte Carlo. Istogramma normalizzato in area. Gli errori sono calcolati a partire dalla statistica dell'istogramma e dagli errori dell'efficienza e della geometria del flusso.

Sono quindi andato a valutare la coordinata dell'angolo  $\lambda_{vtx}$ , mostrata in fig. 3.17. Dalle distribuzioni di questa coordinata si notano differenze marcate tra i dati e il Monte Carlo. In particolare, nelle regioni esterne all'accettazione di VXD è presente un picco nella distribuzione dei dati, che nel MC è quasi inesistente. Questo potrebbe evidenziare una sottostima nel material budget delle strutture di supporto dei moduli dei layers 1 e 2 di PXD o del sistema di readout degli stessi, da parte della geometria nominale, nella regione backward. Inoltre la distribuzione dei dati tende a distribuire più uniformemente i dati tra la regione backward e forward. Il Monte Carlo invece tende a prediligere maggiormente la regione forward e in misura minore la regione backward, rispetto ai dati.

Infine, si nota che nella regione centrale c'è una mancanza di vertici nell'istogramma, per entrambe le distribuzioni. La regione centrale è la regione in cui i fotoni attraversano i sensori perpendicolarmente. La quantità di spazio attraversato è dunque minore e quindi la probabilità di interazione più bassa.

L'ultima coordinata che è stata valutata è la distanza dal punto di interazione, mostrata in fig. 3.18. A differenza della coordinata R, che corrispondeva alla distanza dall'origine degli assi X,Y, la distanza dal punto di interazione è calcolata come  $\text{distIP} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ .

L'istogramma sottolinea come la distribuzione Monte Carlo tenda ad accumulare le entrate vicino all'IP e diminuisca allontanandosi da esso, rispetto alla distribuzione dei dati. Il grafico conferma quindi la tendenza mostrata nella radiografia di fig. 3.12. Se ci attacchiamo in maniera convinta all'approssimazione della sezione d'urto per la produzione di coppie non dipendente dall'energia, questa distribuzione può essere spiegata da un material budget generalmente sovrastimato nelle regioni più vicine all'IP (o sottostimato in quelle più lontane). Per confermare la formula approssimata della sezione d'urto, sono quindi stati rifatti gli stessi istogrammi con un taglio in energia più alto:  $0.5 \text{ GeV} < E_\gamma < 1.5$

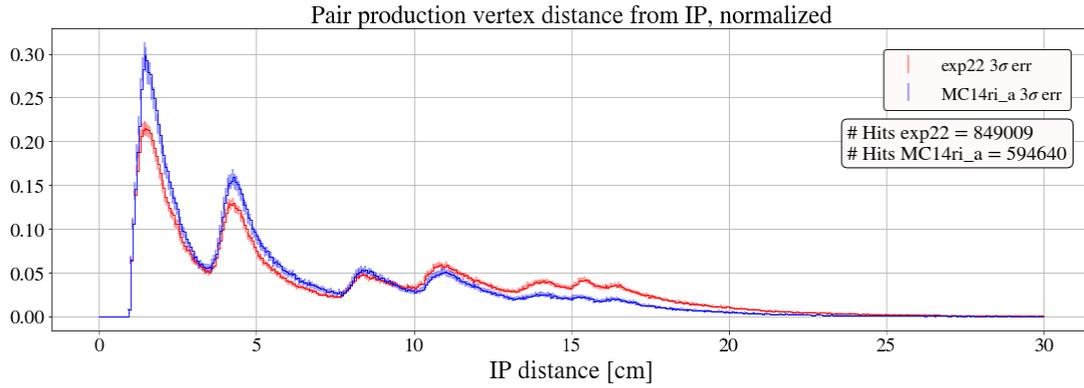


Figura 3.18: Distribuzione della distanza dei vertici dall’IP per i dati e per il Monte Carlo. Istogramma normalizzato in area. Gli errori sono statistici e calcolati a partire dalla statistica dell’istogramma e dagli errori dell’efficienza e della geometria del flusso.

GeV. Gli istogrammi non hanno mostrato differenze rispetto a quelli mostrati in questa sezione, se non nella diminuzione della statistica. I grafici sono mostrati in appendice 6.4.

### 3.5.4 Lunghezza di radiazione Dati-MC

Utilizzando i dati mostrati nella sezione precedente, ho cercato di quantificare le differenze mostrate in termini di lunghezza di radiazione. Questa analisi è stata fatta solo per le coordinate  $\lambda_{vtx}$  e IPdist. La distribuzione in  $\phi_{vtx}$  non è utilizzabile essendo le differenze riconducibili ad un disallineamento di alcuni moduli e non al material budget, rendendo così insensato valutare una differenza in termini di lunghezza di radiazione.

La lunghezza di radiazione è definita come  $X_0 = 7/9\lambda$ , dove in questo caso  $\lambda$  indica il cammino libero medio dei fotoni prima di convertire in una coppia  $e^+e^-$ . Questa definizione implica che una maggiore concentrazione di vertici indica una lunghezza di radiazione minore. Calcolare in termini assoluti la percentuale di lunghezza di radiazione partendo dal numero di vertici senza sapere il numero di fotoni prodotti in partenza è impossibile. Posso però fare una valutazione sulla differenza relativa. Ho quindi calcolato il rapporto bin per bin delle distribuzioni mostrate in fig. 3.17 e fig. 3.18. L’errore del rapporto è stato calcolato attraverso la seguente formula:

$$\sigma_{X_0} = \sigma \left( \frac{n_{\text{exp22}} - n_{\text{MC}}}{n_{\text{MC}}} \right) = \left[ \left( \frac{\sigma_{\text{exp22}}}{n_{\text{MC}}} \right)^2 + \left( \frac{n_{\text{exp22}}}{n_{\text{MC}}^2} \cdot \sigma_{\text{MC}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

dove  $n_{\text{MC}}$  è il valore del bin n-esimo della distribuzione MC (normalizzata in area),  $n_{\text{exp22}}$  è il valore del bin n-esimo della distribuzione dei dati normalizzata.  $\sigma_{\text{exp22}}$  e  $\sigma_{\text{MC}}$  sono l’errore del bin n-esimo della distribuzione dei dati e del MC rispettivamente, calcolato dalla formula 3.1.

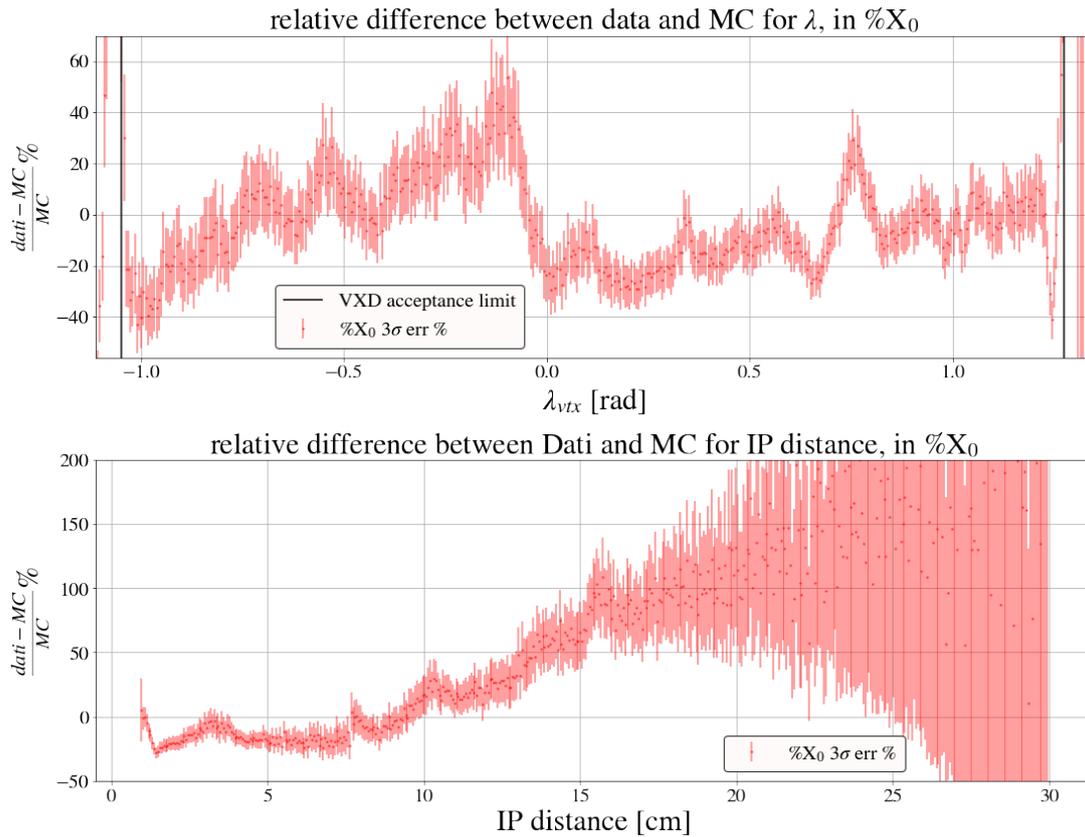


Figura 3.19: In alto la differenza relativa di  $X_0$  percentuale in funzione di  $\lambda_{vtx}$ . Il plot è stato limitato sull'asse Y per apprezzare meglio le differenze all'interno dell'accettanza di VTX. In basso la differenza relativa di  $X_0$  percentuale in funzione della distanza dal punto di interazione. Per il calcolo dell'errore vedere la formula 3.2.

Le informazioni presentate in fig. 3.19 sottolineano ulteriormente i ragionamenti proposti nella sezione precedente. Nella prima figura 3.19 è evidente come la distribuzione del MC indichi una geometria nominale con un material budget maggiore nella regione forward e minore nella regione backward. A parte le zone oltre l'accettazione di VXD, possiamo concludere che la differenze in  $\lambda_{vtx}$ , per quanto non compatibili nella maggior parte della distribuzione, sono comunque contenute.

Per quanto riguarda la seconda figura 3.19 le cose sono diverse. La differenza in material budget all'aumentare della distanza dal punto di interazione diventa sempre più inaccettabile. Tuttavia, è probabile che il problema sia accentuato dalla bassa statistica a distanze maggiori, che evidenzia possibili fluttuazioni. L'andamento della distribuzione è però chiaro: Il MC concentra il material budget vicino all'IP, i dati li distribuiscono più uniformemente lungo tutta la distribuzione.

Infine ho provato a dare una valutazione mettendo insieme le due coordinate in un istogramma 3D, cercando così di capire quali parti della geometria di VXD andrebbero migliorate.

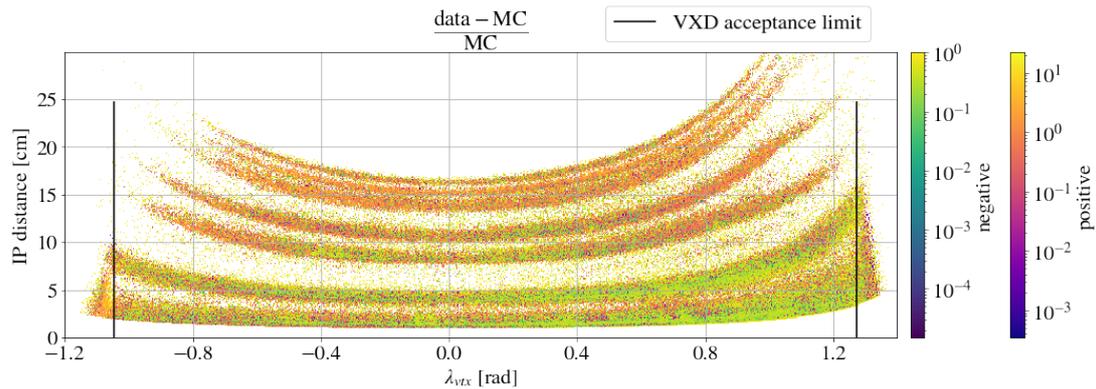


Figura 3.20: Differenza relativa del material budget in funzione della distanza dal punto di interazione e di  $\lambda_{vtx}$ . Istogramma in scala logaritmica in Z. Sono state usate due scale di colori differenti per evidenziare i bin in cui i dati sono maggiori del MC (scala positiva) e quando sono minori (scala negativa). In appendice sono mostrati i grafici delle distribuzioni dei dati e del MC, fig. 6.5.

La fig. 3.20 rappresenta le differenze relative del material budget in funzione della distanza dall'IP e di  $\lambda_{vtx}$ . L'istogramma mostra come l'accumulo di dati ai limiti dell'accettazione di VXD sia dovuto ai 3 layers più interni. In particolare, nella zona a  $\lambda_{vtx} \simeq -1.1$  rad, il problema sembra essere causato dal supporto dei due layers di PXD o dal sistema di readout dei layers. La geometria di questi due oggetti andrà quindi rivalutata. Tra il layer 3 e 4 di SVD si nota un leggero accumulo di dati corrispondente alle ribs di supporto del layer 4. È probabile che il material budget delle ribs sia stato quindi sottostimato. Infine rimane la differenza di material budget, più bassa per il MC, allontanandosi dal punto di

interazione.

Questo lavoro di confronto del material budget tra dati e MC, anche se ancora preliminare, fornisce indicazioni importanti su dove intervenire e rappresenta una metodologia utilizzabile per rendere la descrizione del rivelatore nel MC più realistica.

# Capitolo 4

## Prototipo modulo VTX L5

Questo capitolo è dedicato ai layers esterni di VTX. Nella prima parte introdurrò le idee su cui si basano i primi concetti di oVTX. Poi entrerà più nello specifico concentrandomi sul layer 5, il layer più esterno: sono stati prodotti i primi prototipi su cui ho fatto i primi test della parte meccanica ed elettrica.

### 4.1 Le sfide di VTX

Al momento VTX si trova nella sua fase di progettazione preliminare, in cui si stanno valutando i possibili concetti utilizzabili per la sua realizzazione, che verranno poi inseriti nel CDR (Conceptual Design Report). Il CDR di VTX è previsto per la fine del 2022. Al momento quindi stiamo studiando le soluzioni di fattibilità.

L'upgrade del rivelatore Belle II è previsto durante il LS2 (Long Shutdown 2) programmato per il 2026-2027. Insieme a VTX, anche altri sottorivelatori di Belle II sfrutteranno il periodo di pausa nella presa dati, allo scopo di modificare l'hardware e migliorarne le prestazioni. L'upgrade più importante però riguarda l'acceleratore SuperKEKB: LS2 infatti è stato programmato principalmente allo scopo di attuare le modifiche necessarie all'acceleratore, in particolare nella regione di interazione, per poter raggiungere il valore di luminosità di picco nominale di  $6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Al momento, il progetto VTX è sostenuto da 18 differenti istituti di ricerca. Dall'inizio del 2021 il gruppo che si occupa dello sviluppo di VTX ha cominciato ad incontrarsi settimanalmente in maniera regolare. Da questi incontri sono state stabilite le prime specifiche per il nuovo rivelatore di vertice (vedi sez. 2.4.2).

### Possibili Configurazioni di VTX

Al momento sono state proposte due possibili configurazioni di VTX. La prima, e più probabile, è quella composta da un rivelatore a pixel di 5 layers, mentre nella seconda proposta il rivelatore è composto da 7 layers. In entrambi i casi, VTX occuperà il volume occupato dall'attuale rivelatore di vertice VXD.

Una prima simulazione è stata fatta per valutare la differenza di performance tra l'attuale VXD e le due possibili configurazioni di VTX. I risultati sono mostrati in fig. 4.1 e mostrano come - in entrambe le configurazioni VTX - rispetto a VXD, l'efficienza aumenti considerevolmente a bassi livelli di impulso trasverso ( $p_t < 200$  MeV), così come anche la risoluzione su  $p_t$  per  $p_t < 500$  MeV.

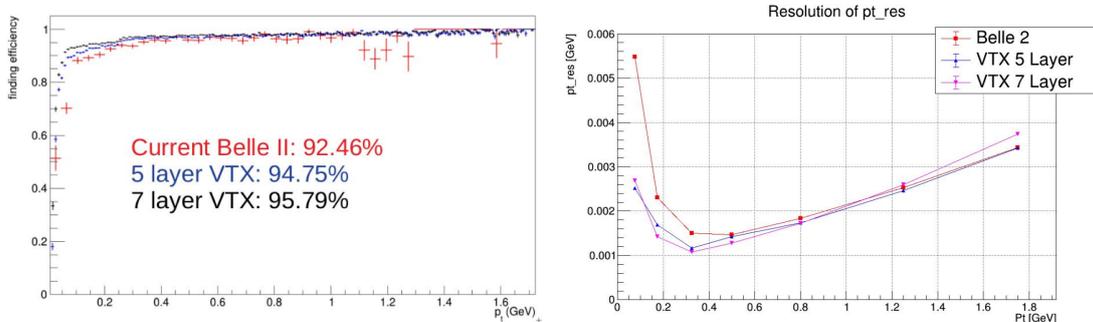


Figura 4.1: Confronto tra VTX con 5 layers, VTX con 7 layers e l'attuale VXD. A sinistra l'efficienza di identificazione delle tracce relativa a tutte le particelle tracciabili ("finding efficiency"), in combinazione con la CDC (sia per VXD che VTX), in funzione dell'impulso trasverso. A destra la risoluzione dell'impulso trasverso in funzione di esso [21].

Il gruppo di lavoro di VTX sta attualmente valutando, mediante studi sulla sensibilità in alcuni canali di fisica particolarmente importanti ("benchmark studies"), se i risultati delle simulazioni giustificano la maggiore complessità della configurazione di VTX a 7 layers.

### 4.1.1 VTX L5

Concentrandosi sui layers esterni di VTX in configurazione a 5 layers, l'obiettivo è quello di riuscire a creare dei moduli, che riescano ad avere un material budget minore allo 0.3%  $X_0$  per i layers 3 e 4, mentre per il layer più esterno l'obiettivo è di 0.8%  $X_0$ . Questi moduli saranno composti da una struttura di supporto per i sensori a pixel, una circuiteria in grado di alimentare i sensori e di portare all'esterno i dati, un sistema di raffreddamento (la richiesta di dissipazione termica è troppo alta per potersi avvalere della sola aria).

Per quanto riguarda i sensori, al momento si pensa di utilizzare per tutti i layers di VTX il sensore OBELIX, introdotto nella sez. 2.4.2.

Al momento, all'INFN sez. Pisa, ci stiamo concentrando sui moduli del layer 5, quello più esterno, cioè quello composto dai moduli più lunghi. Ci concentriamo su questo modulo perché è quello più difficile da realizzare, una volta trovata una soluzione prototipale per questo modulo, si prevede che la soluzione possa essere estesa ai moduli dei layers 3 e 4.

I sensori OBELIX dissipano complessivamente una potenza troppo alta da evacuare dall'area dei moduli di oVTX facendo fluire sola aria, a meno di non sof-

fiare aria ad una velocità talmente alta da compromettere la stabilità meccanica dei moduli. Un sistema di cooling a liquido è quindi richiesto.

### Cooling pipe

Nel caso dell'attuale SVD sono i soli chip dell'elettronica di lettura a dissipare calore nella zona sensibile al passaggio delle particelle. In quel caso quindi il problema era stato risolto facendo passare un unico tubo di raffreddamento a contatto con gli APV25, disposti lungo un'unica linea.

Nel caso di VTX invece è tutto il sensore a dissipare calore. Bisogna quindi creare delle "piastre" che, poste a contatto termico con i sensori, possano efficientemente trasportare all'esterno l'energia dissipata. Una possibile soluzione è quella di creare un sandwich formato da due piastre di materiale termicamente conduttivo, all'interno del quale vengono posti uno o più tubi, dentro cui far scorrere il liquido refrigerante.

### Circuiteria

Il circuito per la lettura e l'alimentazione del modulo, nel caso dei layers esterni, può essere posto sia nella parte forward, che nella parte backward. Sfruttando questa possibilità si può quindi dividere la circuiteria in due parti separate. Al momento, per i sensori del layer 5 si è optato per un circuito di alimentazione dedicato per ogni sensore, così come anche per la raccolta dei dati.

La sfida in questo caso è quella di creare un circuito con un material budget minimo, ma che sia in grado di mantenere l'integrità dei segnali provenienti dai sensori, oltre che essere in grado di fornire la potenza richiesta da essi. Una possibile soluzione è quella di creare un circuito in alluminio invece che in rame. L'alluminio infatti ha una lunghezza di radiazione di 8.897 cm, più alta di quella del rame di 1.436 cm. La sua conducibilità elettrica di  $37.7 \times 10^6$  S/m è di poco minore di quella del rame ( $59.6 \times 10^6$  S/m). Combinando queste due caratteristiche

$$\left( \sqrt{\frac{X_0^{\text{Al}}}{X_0^{\text{Cu}}}} \cdot \frac{\sigma^{\text{Al}}}{\sigma^{\text{Cu}}} \right) \simeq 1.6$$

l'alluminio risulta essere una soluzione più vantaggiosa, anche se con un costo di realizzazione maggiore (vista la procedura non standard di produzione).

### Struttura di supporto

La struttura meccanica deve al contempo essere la più rigida possibile e la più leggera possibile. La rigidità è richiesta per la stabilità geometrica del modulo. Come nel caso di VXD anche i moduli di VTX verranno posizionati in modo da avere una leggera sovrapposizione delle aree sensibili, tra un modulo e i moduli vicini. Questa sovrapposizione serve principalmente per l'allineamento del sottorivelatore. Una struttura stabile è quindi fondamentale per poter mantenere la geometria precisa nel tempo.

In particolare la struttura deve essere sufficientemente rigida da non far toccare tra di loro i moduli. Il layer 5 infatti sarà lungo  $\sim 72$  cm. La rigidità della struttura deve essere tale che le sue frequenze di risonanza stiano al di sopra dei 200 Hz (la questione verrà affrontata approfonditamente nella sez. 4.3).

La leggerezza è richiesta per la minimizzazione del contenuto in materiale, causa di multiplo scattering. Il modulo, per poter stare all'interno dei limiti di material budget imposti, deve essere il più leggero possibile. I materiali compositi, sono al momento la tecnologia più all'avanguardia per soddisfare questi criteri.

## 4.2 Scelte progettuali VTX L5

Al momento non siamo ancora in grado di dare le specifiche tecniche complete o definitive di VTX. Tuttavia, per poter capire con quali specifiche il rivelatore di vertice potrà essere costruito, è necessario iniziare a studiare delle possibili soluzioni. All'INFN sez. di Pisa sono stati quindi sviluppati alcuni prototipi che potrebbero soddisfare i requisiti fisici elaborati dal gruppo di lavoro di VTX. Di seguito sono presentate le scelte progettuali che sono state fatte fino ad oggi.

### 4.2.1 Struttura di supporto

I sensori dei layer più esterni di VTX non saranno sostenuti direttamente da strutture in silicio (come per i iVTX), in quanto sono troppo lunghi e massivi per poter adottare questa soluzione. Si è quindi optato per una struttura di supporto dedicata, appositamente pensata per sorreggere tutto il sistema di sensori, raffreddamento ed elettronica.

#### Concetto struttura di supporto: ITS

Il concetto a cui gli ingegneri dell'INFN<sup>1</sup> si sono ispirati, è quello proposto dall'Ing. C. Gargiulo per l'upgrade del rivelatore di vertice (ITS) dell'esperimento ALICE presso il CERN [25], di cui una rappresentazione della struttura realizzata è mostrata in fig. 4.2.

La struttura di ITS, è lunga 1.5 m. Con una massa di circa 25 g, è in grado di supportare 1.5 kg di materiale, concentrati nella sua zona centrale. Questo tipo di traliccio triangolare è quindi stato scelto come geometria di partenza per lo sviluppo della trave di supporto di VTX L5.

Le soluzioni meccaniche utilizzate per la progettazione di ITS sono state d'ispirazione non solo per la struttura di supporto, ma anche per il resto delle componenti meccaniche di VTX L5, come ad esempio la cold plate. Il traliccio di ITS è stato realizzando con il metodo additivo, assemblando la trave componente per componente. Al contrario, i tralicci di VTX L5 saranno formati da tre

---

<sup>1</sup>La progettazione e simulazione del sistema di supporto e raffreddamento del layer 5 di VTX, è stata realizzata dagli Ing. Maurizio Massa e Ing. Filippo Bosi, dell'INFN sezione Pisa.

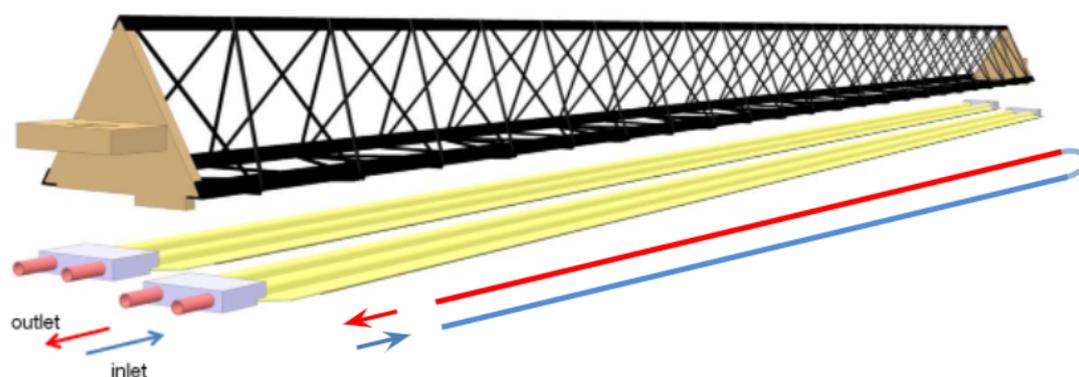


Figura 4.2: Struttura di supporto realizzata dall'Ing. C. Gargiulo per il layer più esterno di ITS, rivelatore di vertice dell'esperimento ALICE.

elementi creati utilizzando il metodo sottrattivo, eliminando quindi il materiale in eccesso dal laminato di partenza.

### Scelta dei Materiali

Data la geometria, ci si è concentrati sulla scelta del materiale più adeguato per il nostro modulo di VTX. A differenza di ITS infatti, il layer più esterno di VTX sarà lungo solo 712 mm: una ricerca dei materiali da utilizzare è quindi obbligatoria.

Viste le loro capacità meccaniche elevate, in rapporto alla loro massa, la categoria di materiali che verrà utilizzata è quella dei materiali compositi, in particolare tessuti in fibra di carbonio e resina epossidica. I materiali compositi vengono solitamente forniti direttamente dalle aziende che li producono già pronti per essere utilizzati. Questo tipo di materiali viene chiamato "preimpregnato" o "prepreg", in quanto l'azienda produttrice fornisce il rotolo di tessuto in fibra di carbonio già impregnato di resina. Ciò permette di avere il materiale composito di qualità garantita dalla stessa azienda, evitando così possibili errori durante la fase di applicazione della resina (bolle d'aria ecc). In fig. 4.3 sono mostrati alcuni dei possibili materiali compositi disponibili sul mercato con le loro caratteristiche principali.

Senza entrare nei dettagli della teoria delle travi, le forze in gioco in un traliccio come quello mostrato in fig. 4.2, sono tutte direzionate lungo le linee create dalla presenza di materiale. Questo significa che il lavoro delle componenti del traliccio può essere approssimato in trazione o compressione. Nelle possibili scelte di fibra di carbonio utilizzabili, quella con le caratteristiche meccaniche migliori in trazione e compressione è sicuramente la fibra unidirezionale. Come il nome fa intendere, i tessuti in fibra di carbonio unidirezionali sono formati da fibre rivolte tutte nella stessa direzione, questo rende il foglio di materiale composito estremamente resistente lungo la direzione delle fibre. La scelta per i moduli del layer 5 di VTX è ricaduta quindi sull'M46J unidirezionale. Una fibra

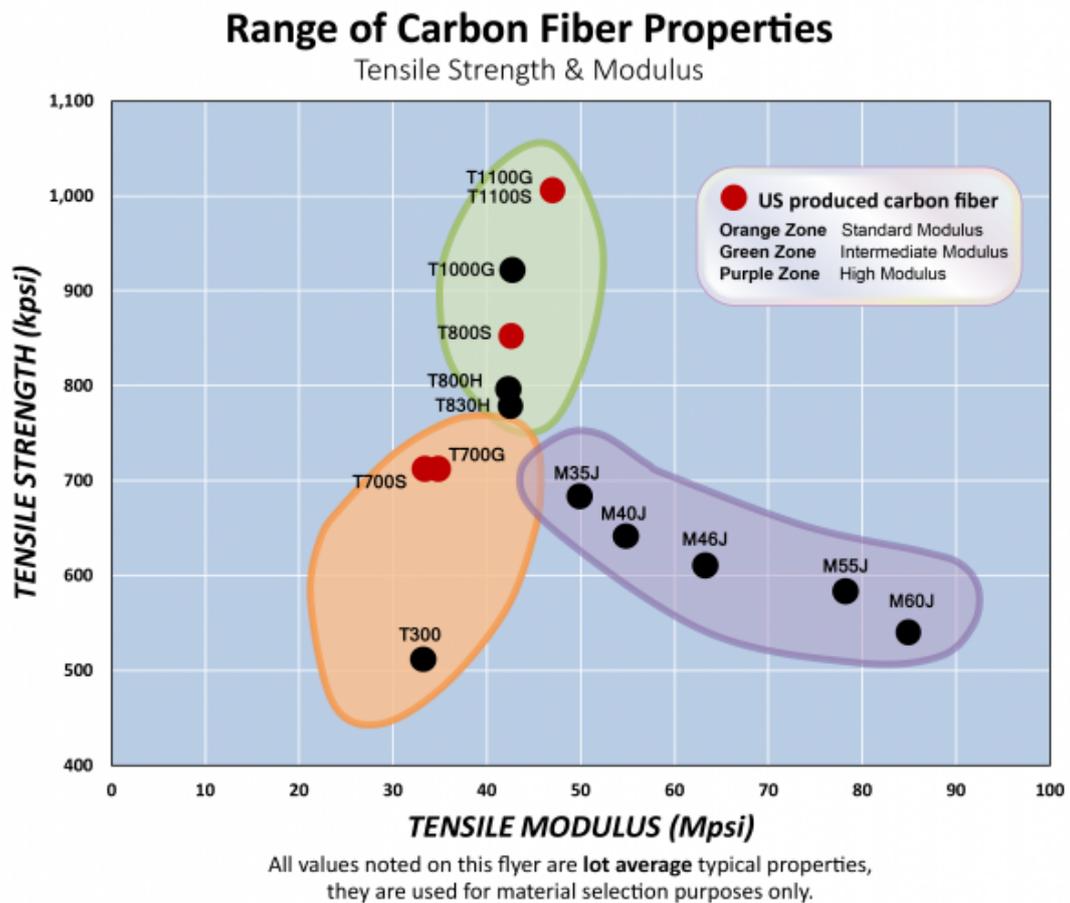


Figura 4.3: Caratteristiche meccaniche delle principali fibre di carbonio in commercio. L'asse delle X corrisponde alla forza elastica della fibra, l'asse delle Y corrisponde alla sua resistenza a rottura [26]. Le fibre unidirezionali (in viola) hanno un alto modulo elastico, ma sono fragili in direzione ortogonale alla fibra. Le fibre denominate dalla sigla T sono pensate per scopi più generici e hanno diverse specifiche a seconda dello scopo di utilizzo.

con un alto modulo di Young e che permette di avere anche una buona tolleranza a rottura.

Alle estremità della trave, come per ITS, anche per VTX L5 si è optato per degli endpieces. Il materiale scelto è stato il PEEK, un polimero ad alte prestazioni, che si presta ad essere ben lavorato meccanicamente.

Un primo prototipo di trave di supporto per VTX L5 è stato realizzato e testato presso i laboratori dell'INFN. Nella sezione 4.3 è presente una spiegazione approfondita sulla produzione e la caratterizzazione del traliccio.

### 4.2.2 Cold plate

Al momento, per i moduli più esterni di VTX si è optato per un design con due file di sensori per ogni modulo. Una figura che mostra l'esploso del modulo di VTX L5 è presentata in fig. 4.4.

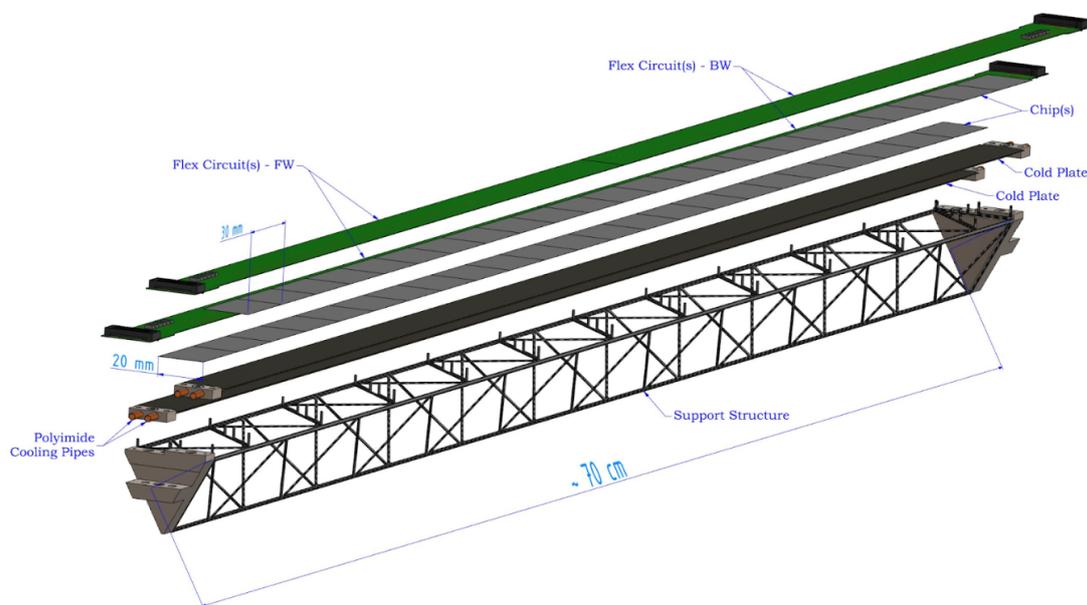


Figura 4.4: Proposta di prototipo del modulo per il layer 5 di VTX.

#### Concetto cold plate

Come mostrato in fig. 4.4, due file di sensori per ogni modulo significa due differenti cold plate per ogni modulo. Le due cold plate vengono quindi messe in contatto con i sensori, permettendo così di evacuarne il calore.

Per la realizzazione di queste componenti si è optato per una struttura a sandwich. Nella parte a contatto con i sensori verrà utilizzata una fibra ad alta conducibilità termica, al di sotto della quale verranno posizionati due tubi. All'interno dei tubi verrà fatto scorrere il liquido refrigerante (acqua demineralizzata) con il compito di trasportare fuori dal modulo il calore prodotto dai sensori. I tubi verranno quindi avvolti dalla parte inferiore del sandwich, in modo

da tenerli in posizione. Durante la fase di cura il sandwich sarà posto all'interno di una maschera di assemblaggio, affinché rimanga tutto in posizione fino a procedimento ultimato.



Figura 4.5: Primo design delle cold plate di VTX L5. Ogni modulo avrà due di queste cold plate.

In particolare, per la fibra di carbonio si è optato per la K13D2U. La K13D2U è una fibra con una conducibilità termica di  $\sim 800 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  (conducibilità della sola fibra, a resina applicata, la conducibilità cala a seconda del tipo di resina e della sua percentuale in rapporto alla fibra). Oltre che per la conducibilità, la scelta è ricaduta sulla K13D2U anche perché è una fibra conosciuta, essendo già stata utilizzata in altri esperimenti. Per la parte interna invece, è stata trovata una soluzione nei tubi in kapton prodotti dalla Nordson Medical. I tubi avranno un diametro interno di 2.67 mm ed esterno di 2.80 mm.

I tubi, che verranno inseriti nel sandwich durante il procedimento, saranno avvolti - nella parte non a contatto con la K13D2U - da un foglio di grafite. La grafite ha una buona conducibilità termica e permette di essere piegata seguendo le geometrie dei tubi, al contrario della K13D2U, molto più rigida. Il compito della grafite sarà quello di trasportare il calore dalla parte non a contatto con i tubi della K13D2U verso di essi. La grafite tende a polverizzare, mentre la K13D2U è una fibra unidirezionale: nella direzione ortogonale alle fibre è quindi molto fragile. Il tutto sarà contenuto all'interno di due fogli di "carbon fleece" che avranno il compito di rendere la struttura più resistente. In fig. 4.6 è mostrata la configurazione della cold plate.

In questa configurazione, la cold plate totale avrà uno spessore di  $\sim 190 \mu\text{m}$ , tubi di raffreddamento esclusi.

Al momento in cui viene presentata questa tesi, un primo prototipo di cold-plate è in fase di produzione dall'azienda Loson Compositi. I primi test termici saranno effettuati all'arrivo (imminente) delle prime cold plate all'INFN.

### 4.2.3 Power bus

I sensori OBELIX che verranno utilizzati per VTX, avranno una larghezza di banda di  $\sim 320 \text{ Mbits/s}$  e una potenza di  $\sim 54.8 \text{ W}$  per ogni modulo. Per i layer esterni di VTX si sta optando per una linea di alimentazione dedicata per ogni

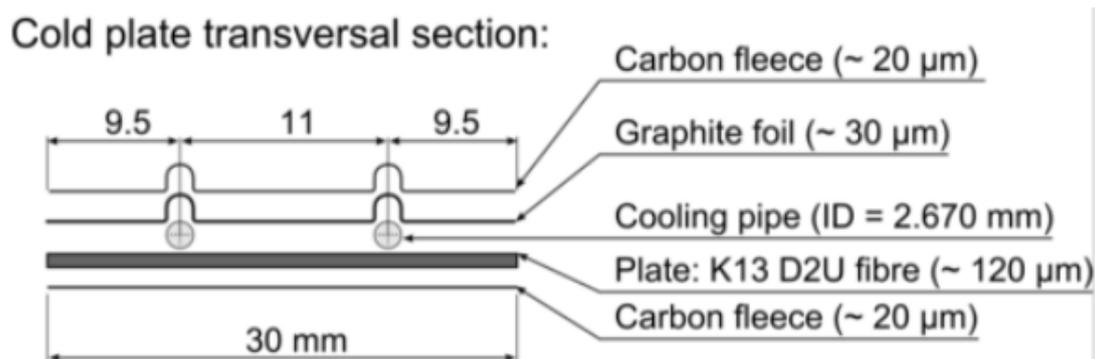


Figura 4.6: Sezione trasversale del progetto della cold plate di VTX L5.

senso. Il sensore è in fase di design e sarà disponibile alla fine del 2022, quindi per ora queste sono le sole specifiche usate per la progettazione del circuito flex<sup>2</sup>, oltre a quella di mantenere il material budget il più basso possibile.

### Circuito flex

Il circuito di VTX L5, sarà diviso in due parti per ogni modulo lungo la sua lunghezza (questo concetto probabilmente non sarà adottato per il layer 3, per garantire maggiore spazio in avanti ai componenti di macchina, si pensa di leggere i moduli L1-L3 dal lato backward). Nel layer più esterno di VTX infatti può essere utilizzata sia la parte forward che backward, per ottimizzare la caduta di tensione del circuito è stato diviso in due. Il circuito è lungo circa 35 cm, con questa lunghezza - per i due sensori centrali - il voltage drop è stato calcolato essere di 100 mV (a cui vanno aggiunti gli altri 100 mV della linea di ritorno).

Per poter rendere il circuito più sottile possibile, è stato scelto di utilizzare il Kapton per il PCB. Questo rende il circuito flessibile, anche se non è una specifica richiesta. Il circuito flex, sarà quindi formato da 4 strati di kapton sul quale saranno fatte passare la linea di alimentazione dei sensori, le due linee dedicate al trasporto dei dati dei sensori (che sarà quindi una linea differenziale) e la linea di massa. Al momento della progettazione, non è stato specificato quale tipo di connettore utilizzare, si è optato per un connettore con angolo retto.



Figura 4.7: Progetto del circuito flex per VTX L5. Nel prototipo di VTX L5 saranno presenti quattro di questi circuiti, due per ogni fila di sensori.

Un circuito flex, come quello mostrato in 4.7, è già stato prodotto. I primi test sul circuito e i loro risultati sono presentati nella sezione 4.5

<sup>2</sup>La fase di progettazione del circuito flex è stata seguita dall'Ing. Massimo Minuti, dell'INFN sez. Pisa

#### 4.2.4 Material budget

Ogni parte del modulo di VTX L5 deve essere progettata con l'obiettivo di mantenere il material budget più basso possibile. Per questo motivo ogni elemento che compone le parti di modulo appena descritto, è stato inserito in un foglio di calcolo per avere una previsione sul material budget totale del modulo. In tab. 4.1 è mostrato il risultato di questo calcolo.

Componente	$X_0$ (%)
Traliccio	0.062
Cold plate	0.066
Tubi e refrigerante	0.166
Colla assemblaggio	0.034
Circuito flex	0.292
Totale	0.570

Tabella 4.1: Lunghezza di radiazione dei componenti del modulo di VTX L5. Il circuito flex forward è 30 mm più lungo del backward. In appendice è presente una tabella completa 6.9.

Come mostrato in 4.1, con queste soluzioni, siamo ben al di sotto dei limiti di material budget di 0.8 %  $X_0$  che il gruppo di VTX si è imposto.

### 4.3 Produzione VTX L5

Per la produzione del primo prototipo di modulo di VTX L5, sono state utilizzate alcune tecniche di prototipazione all'avanguardia. Nelle sottosezioni seguenti sono descritti brevemente i processi di produzione dei vari componenti di VTX L5.

#### 4.3.1 Produzione struttura di supporto

La struttura a traliccio di VTX L5 utilizza un concetto di produzione originale. Per prima cosa vengono prodotti le lastre di carbonio M46J con un layup composto da 4 fogli, in cui le fibre sono disposte a 90° tra di loro in maniera simmetrica: quindi il primo foglio viene disposto a 0°, il secondo a 90°, il terzo a 90° e il quarto di nuovo a 0°. In questo modo non ci sono differenze tra un verso e l'altro del laminato. I fogli vengono così disposti in modo da sfruttare le caratteristiche meccaniche dell'M46J in due direzioni ortogonali. La produzione di questi laminati è stata realizzata dall'azienda Loson Compositi.

I laminati così prodotti, sono quindi stati tagliati ad acqua, asportando il materiale non necessario. Del taglio se n'è occupata l'azienda Watajet. In fig. 4.8 è mostrato il risultato prima e dopo il processo.

Di questi singoli elementi mostrati in fig. 4.8, ne sono stati prodotti di due tipi: uno con una larghezza di taglio di 1 mm, mentre un secondo con una larghezza di taglio di 0.5 mm. Il taglio ad 1 mm è stato valutato come compromesso

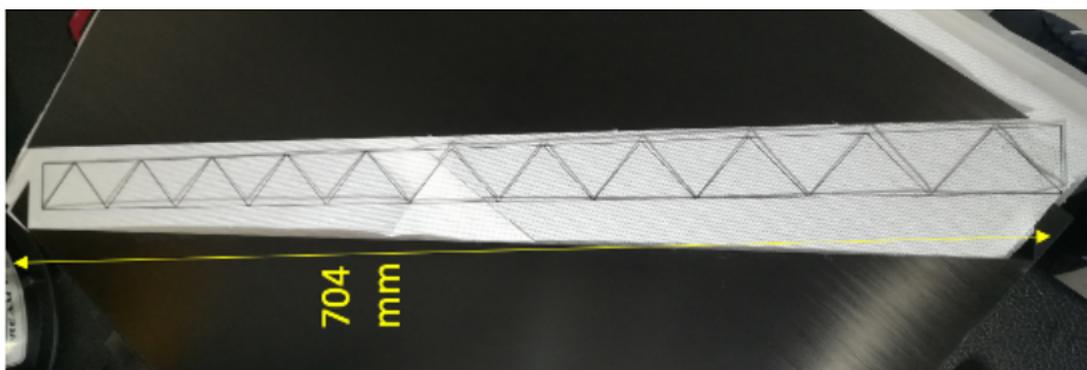


Figura 4.8: singolo elemento della trave di supporto, con il rispettivo laminato di partenza da cui è stata ricavata.

tra il contenimento del material budget e le caratteristiche meccaniche richieste, quello a 0.5 mm è il limite tecnologico a cui l'azienda può arrivare.

Dopo un controllo qualità di ogni singolo elemento (presentato nella sezione 4.4), la trave viene assemblata incollando tra di loro 3 di questi elementi. Per l'incollaggio è stata prodotta una maschera di montaggio apposita in alluminio, prodotta dall'azienda Galli&Morelli su disegno INFN sez. Pisa.

Gli endpieces invece sono stati ricavati fresando un blocco di PEEK. Della produzione se n'è occupata anche in questo caso, l'azienda Galli&Morelli.

### 4.3.2 Produzione delle cold plate

Per la produzione delle cold plates si è seguito un procedimento simile a quello usato per ITS. E' stata costruita una maschera apposita in alluminio. La maschera va a schiacciare tra di loro gli strati che compongono la cold plate, lasciando lo spazio necessario ai tubi in kapton. Questo procedimento è stato eseguito dall'azienda Loson Compositi, che si è occupata anche di reperire il materiale necessario alla realizzazione delle cold plate. In fig. 4.9 è mostrata la prima cold plate estratta dalla maschera di montaggio.



Figura 4.9: Primo prototipo di cold plate, durante la fase di estrazione dalla sua maschera di assemblaggio.

Al momento della presentazione di questa tesi, l'azienda sta producendo ulteriori prototipi per poter effettuare dei test termici.

### 4.3.3 Produzione circuito flex

La produzione del primo prototipo di circuito flex, viene fatta tramite asportazione selettiva del rame in eccesso. Della produzione si è occupata la PCBway su commissione dell'azienda Artel, su progetto dell'INFN sez. Pisa.

Un prototipo di questo tipo, è stato prodotto ed è disponibile presso i laboratori dell'INFN di Pisa. Alcuni test su di esso sono già stati condotti. I test e i relativi risultati sono esposti nella sezione 4.5.

Il prototipo in rame è stato fatto esclusivamente per valutare l'utilizzabilità di questo tipo di circuito in termini di performance. Come si può vedere in tab. 4.1 infatti, il circuito flex è il componente con il maggior material budget. Nella tabella inoltre sono presenti i valori dell'RC in alluminio. L'RC definitivo sarà quindi proposto con le piste fatte in alluminio e non in rame, come quello presentato in sezione 4.5. A causa degli altissimi costi di produzione di un flex in alluminio (dell'ordine delle decine di migliaia di euro), si è quindi optato per un primo prototipo in rame dai costi più contenuti.

La produzione di un flex in alluminio infatti comporta delle tecniche costruttive completamente diverse, che si basano sul deposito del materiale necessario per andare a creare le piste, al contrario dell'asportazione selettiva usata per il rame. Questo tipo di tecnica è in fase di sperimentazione presso i laboratori del CERN di Ginevra. Avendo questo processo un mercato molto ristretto, al momento il CERN rimane l'unico istituto in grado di produrre circuiti stampati di questo tipo.

## 4.4 Caratterizzazione meccanica

La caratterizzazione meccanica del modulo del layer 5 di VTX, comprende il test di flessione, il test vibrazionale e il test di conducibilità termica della coldplate. Quest'ultimo test non è ancora stato eseguito. Prima dei test ho eseguito un controllo qualità di ogni singolo elemento prima dell'assemblaggio delle travi e anche delle travi dopo l'assemblaggio.

### 4.4.1 Controllo qualità

Una volta arrivati all'INFN di Pisa, durante la primavera 2021, gli elementi che compongono il traliccio di supporto, sono stati sottoposti ad alcuni controlli di qualità. Tutte le misure proposte di seguito sono state svolte nei laboratori delle alte tecnologie dell'INFN sezione di Pisa.

#### Singoli elementi del traliccio

Gli elementi si suddividono in due gruppi principali: un primo gruppo di 12 elementi con una larghezza di taglio di 0.5 mm, un secondo gruppo di 13 elementi con una larghezza di taglio di 1.0 mm. Per prima cosa ogni singolo elemento è stato sottoposto ad una misurazione per verificarne la qualità. Per farlo, sono

stati messi, uno ad uno, sotto ad una macchina di misura a controllo numerico, come mostrato in fig. 4.10. La CMM (coordinate-measuring machine) utilizzata è una DEA Ghibli prodotta dalla Hexagon, a cui è stato installato un visore ottico, a differenza del tastatore solitamente utilizzato su questo tipo di macchinario. In questo modo la misura risulta più semplice, mantenendo un valore di incertezza trascurabile (nell'ordine dei 2 – 4  $\mu\text{m}$ ). In fig. 4.11 è presente un esempio di come viene visto l'elemento attraverso il visore ottico.

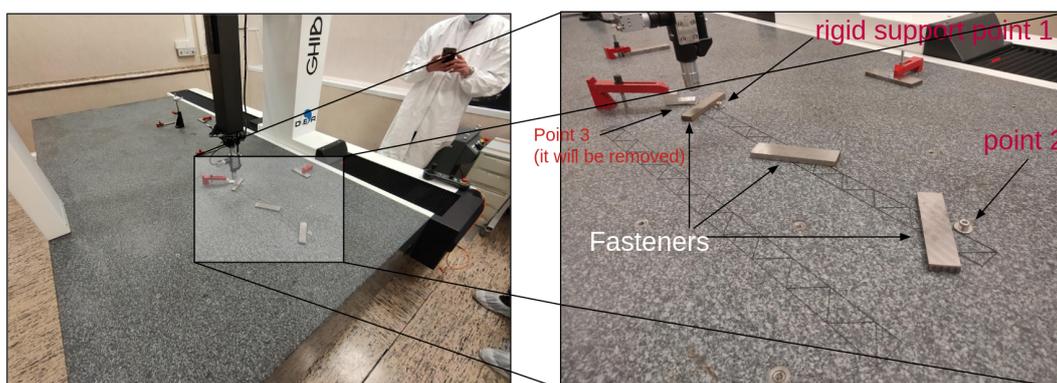


Figura 4.10: Esempio di come vengono fissati gli elementi e di come viene fatta la verifica post produzione.

Ogni misurazione è stata effettuata seguendo una procedura specifica:

- Verifica del lato dell'elemento (fare riferimento alla fig. 4.11).
- Posizionamento dell'elemento, nel verso "up" sulla base in granito della CMM (vedi fig. 4.10).
- A questo punto viene creato il punto di origine tramite il software della CMM, a cui tutti gli altri punti di misura faranno riferimento. Il punto di origine è sempre posizionato sull'angolo basso a sinistra dell'elemento.
- Vengono salvate le coordinate di tutti i punti mostrati in fig. 4.12, nell'ordine mostrato.
- Viene ribaltato l'elemento nel verso "down" e riposizionato.
- Viene presa una seconda origine.
- vengono ripresi gli stessi punti del verso "up".
- Finita la misurazione con la CMM, gli elementi vengono posizionati su una bilancia di precisione per misurarne il peso, con una precisione di 0.001 g.
- Viene infine misurato lo spessore di ogni singolo elemento, la misurazione viene fatta con un micrometro digitale e viene ripetuta in tre punti diversi del lato lungo dell'elemento.

- In ultimo, ogni elemento viene etichettato, ad esempio: "T\_10\_01 up", che corrisponde all'elemento numero 1, con una larghezza di taglio di 1 mm, con etichetta posta sul lato "up".

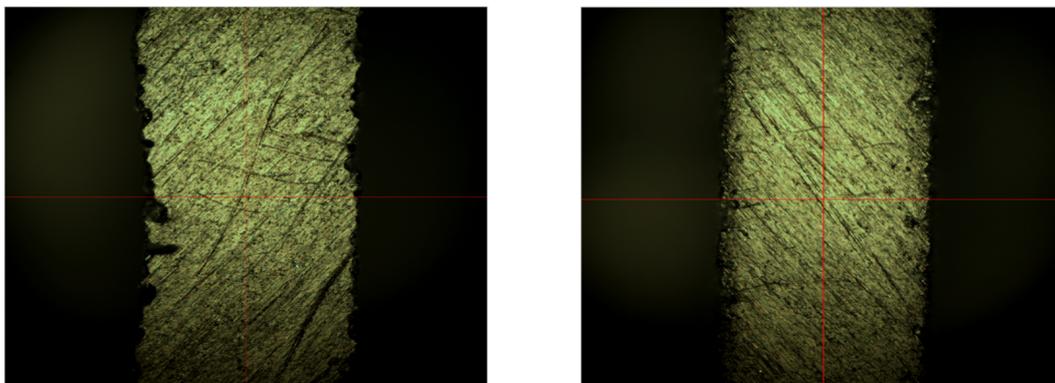


Figura 4.11: Esempio di un elemento visto attraverso il visore ottico usato per la misurazione. A sinistra è mostrato il verso "up", mentre a destra il verso "down".

Durante la misurazione, l'elemento T\_05\_12 è risultato danneggiato e quindi scartato. Come vedremo nella sezione successiva infatti, gli elementi con taglio da 0.5 mm sono risultati particolarmente fragili e quindi delicati da maneggiare.

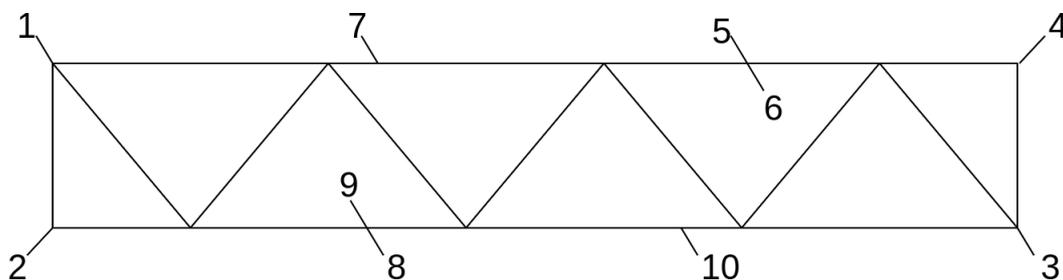


Figura 4.12: Punti in cui è stata salvata la coordinata tramite la macchina di misura, per ogni elemento, il lato lungo è l'asse Y, mentre quello corto è l'asse X. I punti 7, 8 e 9 sono a 250 mm di distanza dal punto 1 (che è anche il punto di origine) lungo l'asse Y, mentre i punti 5, 6 e 10 sono a 500 mm di distanza dal punto 1.

### Risultati misure dei singoli elementi

Come si può vedere dal grafico mostrato in fig. 4.13 gli elementi da 1mm hanno una differenza nella larghezza di taglio di 0.08 mm tra il verso "up" e il verso "down", la stessa differenza è presente negli elementi tagliati a 0.5 mm. Questa differenza è dovuta al cono creato dal getto d'acqua utilizzato per ritagliare i laminati in carbonio. Partendo da questa misure è stato quindi calcolato l'angolo corrispondente al cono di taglio, attraverso la formula:

$$\theta_{cut} = \arctan\left(\frac{w_{up} - w_{down}}{2 \cdot thk}\right)$$

dove  $w_{up}$  è la larghezza di taglio del verso "up",  $w_{down}$  è la larghezza di taglio del verso "down" e  $thk$  è lo spessore della trave. Il risultato mediato su tutti gli elementi fornisce  $\theta_{cut} \simeq 8^\circ$  sia per gli elementi da 1 mm che quelli da 0.5 mm.

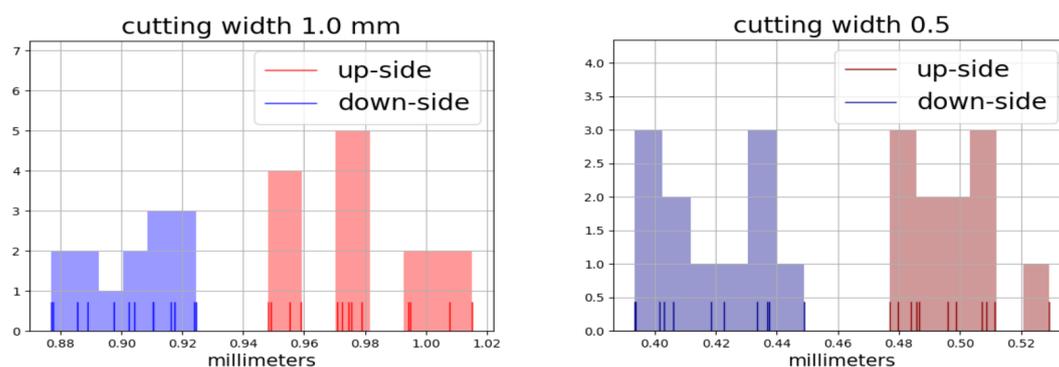


Figura 4.13: Distribuzioni della larghezza di taglio dei singoli elementi. A sinistra gli elementi da 1 mm, a destra quelli da 0.5 mm, mediata tra la differenza dei punti 5-6 e 8-9.

Con le misure effettuate ho calcolato anche quanto rettilinei sono gli elementi nella direzione del lato più lungo. Per farlo ho calcolato la distanza tra i punti 5 e 7 (fare riferimento alla fig. 4.12) e la retta passante per i punti 1 e 4. Allo stesso modo sul lato opposto si sono utilizzati i punti 8 e 10 e la retta passante per i punti 2 e 3. I risultati sono mostrati in fig. 4.14. Come si può vedere dai grafici, gli elementi da 0.5 mm tendono ad essere meno "dritti" rispetto a quelli da 1 mm, questo aspetto renderà particolarmente ostico l'assemblaggio della trave, spiegato nella prossima sezione.

Quindi sono passato al controllo dello spessore e della massa di ogni elemento. Per la misura dello spessore ho utilizzato un micrometro digitale Mahr 40 EX, con precisione di  $1 \mu\text{m}$ . Per la misura della massa invece si è utilizzata una bilancia di precisione KERN, con una precisione di 0.001 g. Per evitare errori dovuti alle fluttuazioni dei valori durante la misurazione, come incertezza ho utilizzato 0.01 g.

La misura dello spessore è stata fatta misurando tre punti differenti dei due lati più lunghi di ogni elemento, a  $\sim 5$  mm dall'inizio, a  $\sim 5$  mm dalla fine e nel punto medio. I risultati mostrati nelle fig. 4.15 e 4.16 mostrano chiaramente la distinzione tra i tre differenti spessori dei tre tipi di laminato utilizzato. Gli elementi ricavati partendo dai laminati di  $\sim 0.65$  mm di spessore, sono risultati deformati in alcuni punti. L'azienda produttrice ha confermato di aver avuto dei problemi durante la laminatura che hanno creato le deformazioni riscontrate. Gli elementi da 0.65 mm di spessore non sono quindi stati utilizzati per assemblare i prototipi dei tralicci.

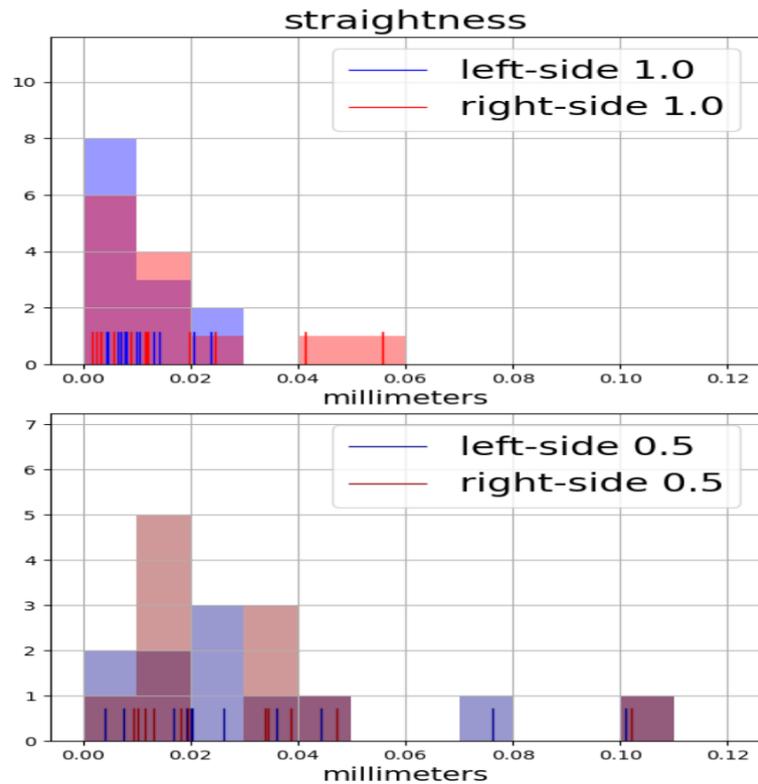


Figura 4.14: Distribuzioni delle distanze tra i punti centrali del lato lungo, rispetto alla retta passante per gli angoli dell'elemento. In alto gli elementi da 1 mm, in basso quelli da 0.5 mm.

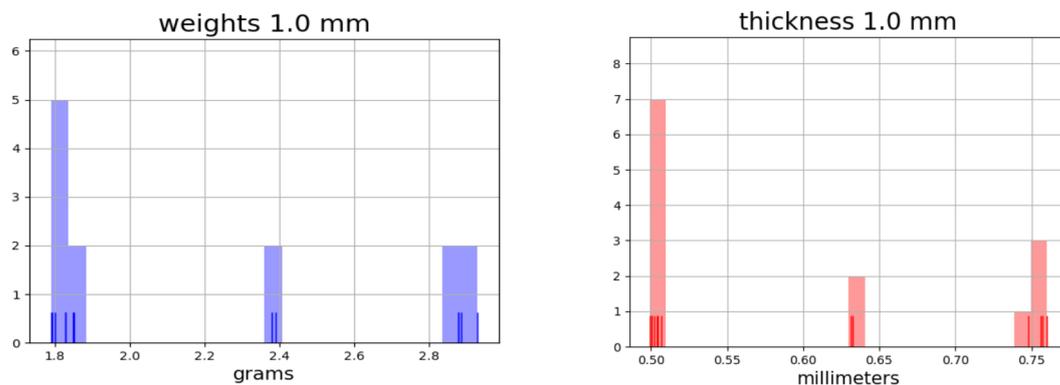


Figura 4.15: A sinistra la distribuzione delle masse dei singoli elementi da 1 mm di larghezza di taglio, a destra la distribuzione degli spessori dei singoli elementi.

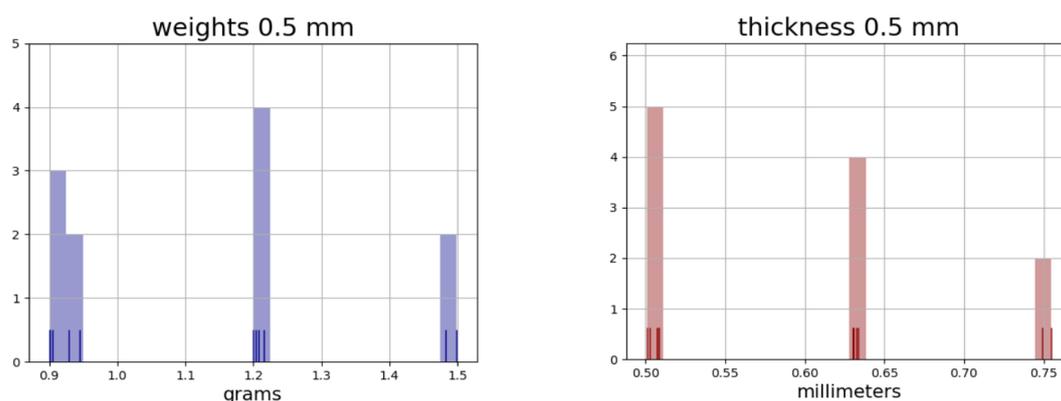


Figura 4.16: A sinistra la distribuzione delle masse dei singoli elementi da 0.5 mm di larghezza di taglio, a destra la distribuzione degli spessori dei singoli elementi.

Infine, in vista dell'assemblaggio, ho misurato anche la larghezza interna di ogni elemento. Questa misura verrà poi utilizzata per il disegno della maschera di assemblaggio del traliccio.

### Assemblaggio del traliccio

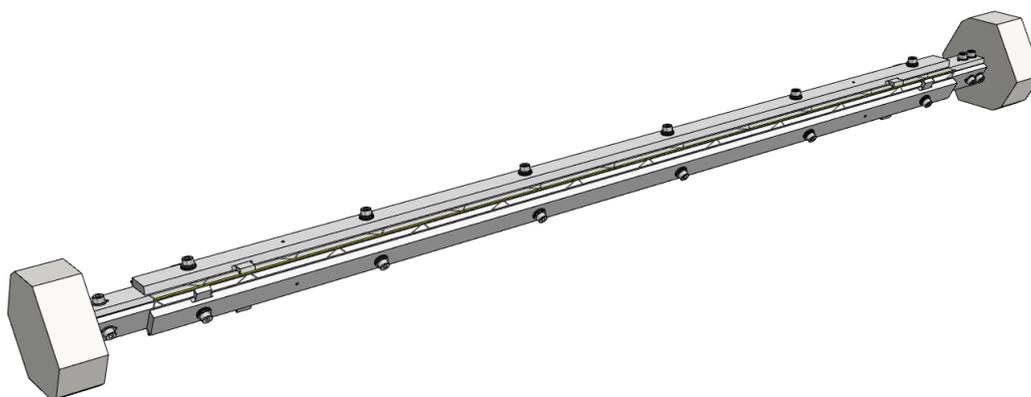


Figura 4.17: Disegno CAD della maschera di assemblaggio dei tralicci in carbonio. Le aste centrali sono fissate al nucleo della maschera tramite delle viti, togliendo queste parti si possono inserire i singoli elementi. Questi ultimi, una volta posizionati, vengono bloccati da queste aste centrali.

Il prototipo della struttura che supporterà un modulo del layer 5 di VTX, viene assemblato partendo da tre elementi, così da andare a formare un traliccio triangolare. Per ogni traliccio vengono utilizzati elementi di uguale spessore e larghezza di taglio. Per il primo modulo siamo partiti dagli elementi T\_10\_10, T\_10\_12 e T\_10\_13, tutte da 1 mm di larghezza di taglio e 0.5 mm di spessore.

Per poter incollare tra di loro gli elementi con precisione è stata creata una maschera di montaggio, appositamente progettata e mostrata in fig. 4.17. La

maschera è stata progettata con dei "pettini" di posizionamento, che tuttavia si sono rivelati non necessari, in quanto il singolo elemento viene bloccato in posizione semplicemente stringendo le viti di fissaggio della maschera. Una volta posizionati i tre elementi, la trave, pronta per essere incollata, si presenta come in fig. 4.18.

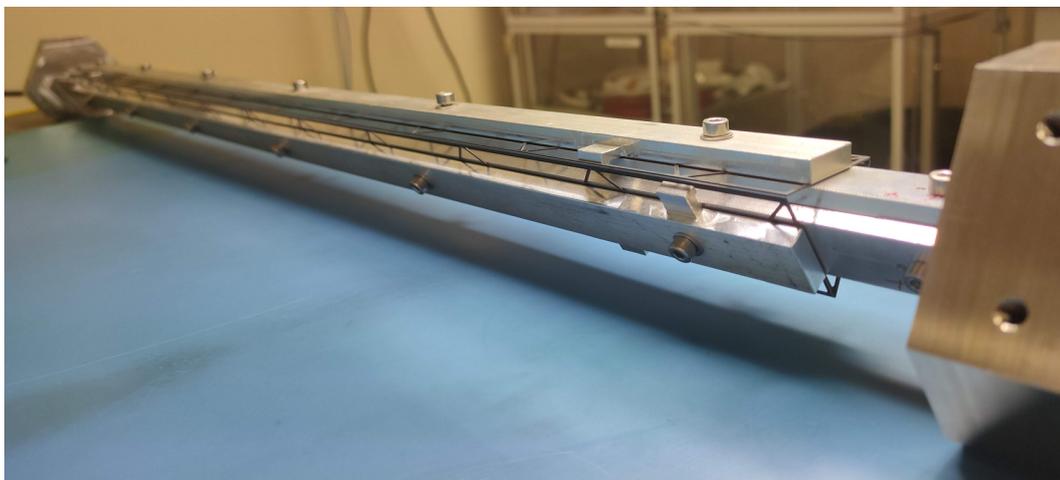


Figura 4.18: Fotografia del primo prototipo di traliccio del layer 5 di VTX, posizionato sulla maschera di assemblaggio e pronto per essere incollato.

A questo punto, gli elementi vengono fissati tra di loro utilizzando alcune gocce di cianoacrilato, una colla a cura rapida. Questo passaggio è necessario affinché possano essere chiusi i punti di luce rimanenti, anche dopo essere stati posizionati i tre elementi, in modo che la colla di assemblaggio non coli attraverso di essi. Successivamente si procede all'incollaggio vero e proprio.

L'incollaggio viene fatto manualmente, depositando una linea di colla nel punto di giunzione tra gli elementi. La colla utilizzata è l'Araldite 2011, una colla strutturale dalle note caratteristiche di resistenza alla radiazione ionizzante, che ha un tempo di cura di circa 24 ore a 20°C. Viene quindi incollato un solo punto di giunzione al giorno. Un'immagine del processo di incollaggio è presentata in fig. 4.19

Dopo l'indurimento della colla, il traliccio assemblato viene estratto dalla maschera di montaggio, smontando quest'ultima e sfilandolo. Il risultato finale è mostrato in fig. 4.20. Abbiamo valutato di creare un cordone di colla anche nella parte interna degli angoli della trave. Dopo un esame al microscopio però, ci siamo accorti che la microcolatura, avvenuta durante la fase di cura, è stata sufficiente a far trafilare la colla anche nella parte interna del traliccio.

La struttura di supporto dei moduli del layer 5, si completa montando gli "endpieces", ovvero i pezzi che fissano il traliccio al supporto del layer 5, mostrati in fig. 4.21.

Gli endpieces sono quindi stati incollati alle due estremità del traliccio utilizzando l'Araldite 2011. Per evitare problemi di colatura, gli endpieces sono stati posizionati in una morsa e l'incollaggio è stato fatto lasciando il traliccio in

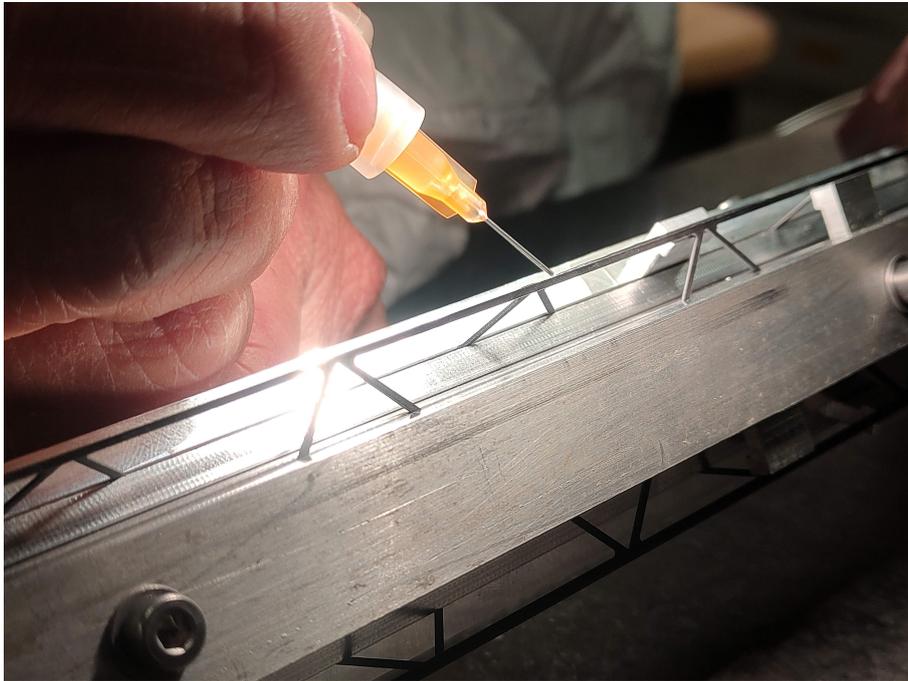


Figura 4.19: Fotografia che rappresenta un momento della fase di incollaggio del traliccio.

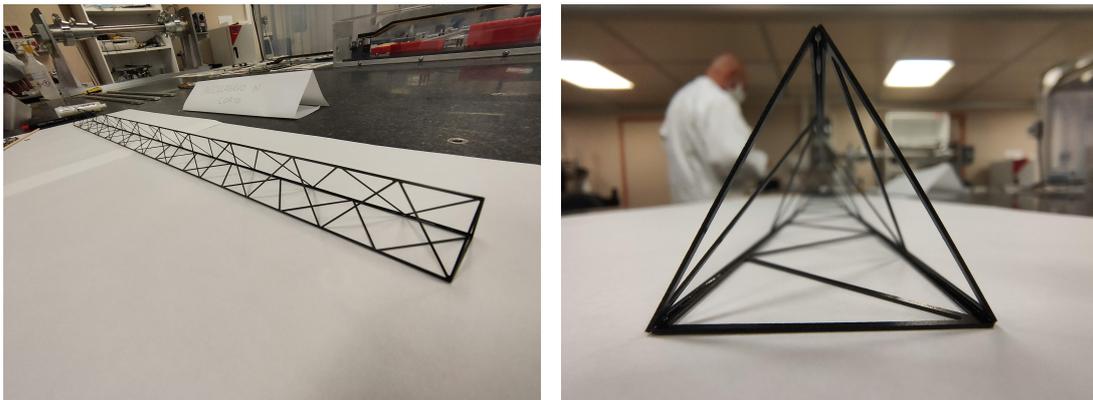


Figura 4.20: Primo prototipo del traliccio assemblato.

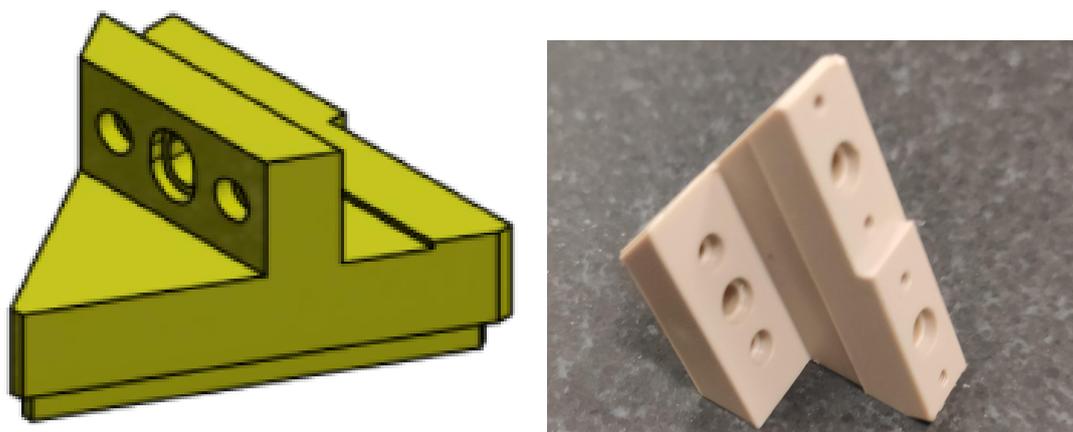


Figura 4.21: Sulla sinistra il disegno CAD dell'endpiece, sulla destra una fotografia dell'endpiece.

posizione verticale durante la fase di cura. Allo stesso modo è stato incollato il secondo endpieces all'altra estremità della trave. Il risultato finale della trave di supporto così assemblata è mostrato in fig. 4.22.



Figura 4.22: Fotografia della trave di supporto ad assemblaggio completato.

Oltre alla trave rappresentata nelle immagini di questa sezione, sono stati assemblati altri 2 tralicci utilizzando gli elementi da 1 mm di larghezza di taglio. Un primo traliccio utilizzando altri elementi da 0.5 mm di spessore, in particolare T\_10.02, T\_10.04 e T\_10.06. Il secondo traliccio è stato assemblato utilizzando elementi con spessore da 0.75 mm, in particolare T\_10.01, T\_10.03 e T\_10.05.

Questi ulteriori tralicci verranno utilizzati per avere un minimo di statistica e per fare un confronto tra una trave assemblata utilizzando gli elementi da 0.5 mm di spessore e quelli da 0.75 mm di spessore. A causa dell'alto costo, sono stati prodotti soltanto 2 endpieces in PEEK, quindi per queste due travi di riserva, gli endpieces sono stati stampati in ABS, utilizzando la stampante 3D presente nei laboratori di alte tecnologie dell'INFN di Pisa. Per i test flessionali le differenti caratteristiche meccaniche dei due materiali degli endpieces non influenzano i risultati.

Infine è stato assemblato anche un traliccio utilizzando elementi con larghezza di taglio da 0.5 mm. Tuttavia, questi elementi si sono rivelati eccessivamente delicati e, durante la fase di estrazione dalla maschera, è stato rotto. Non sono quindi stati realizzati altri tralicci utilizzando gli elementi da 0.5 mm di larghezza di taglio.

### Controllo di qualità della trave

A fase di assemblaggio avvenuta, sono stati effettuati dei controlli di qualità sui tralicci completati. Per prima cosa è stata effettuata una misura della massa di ogni componente del traliccio. I tre elementi in carbonio che lo compongono hanno una massa complessiva di  $5.44 \pm 0.01$  g, mentre la trave dopo l'assemblaggio (prima di inserire gli endpieces) ha una massa di  $5.80 \pm 0.01$  g. Per sottrazione la quantità di colla utilizzata per l'assemblaggio corrisponde quindi a  $0.36 \pm 0.01$  g. I due endpieces hanno massa rispettivamente di  $9.74 \pm 0.01$  g e  $9.69 \pm 0.01$  g, come mostrato in fig. 4.23 infatti, non sono perfettamente simmetrici.

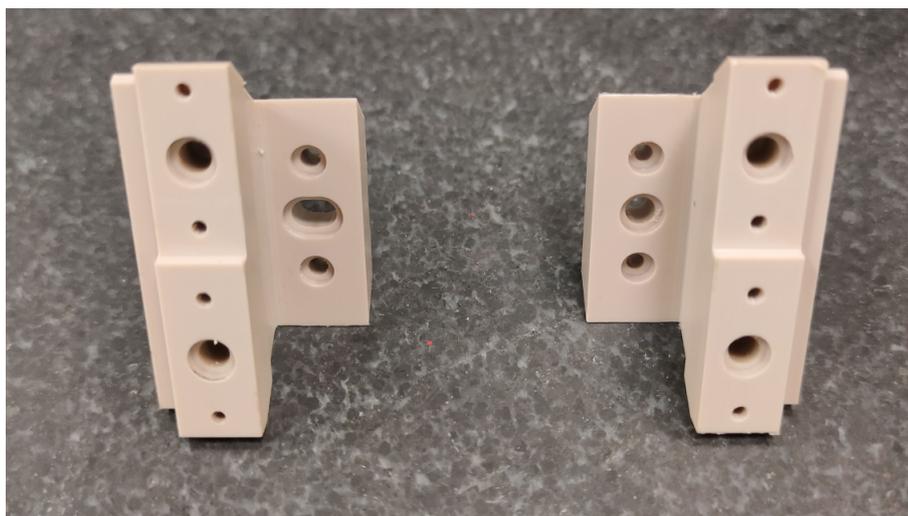


Figura 4.23: Fotografia dei due endpieces utilizzati per l'assemblaggio del primo prototipo. L'endpieces di sinistra presenta un foro asolato, necessario al corretto posizionamento sul cono che sostiene tutti i layers di VTX. L'endpieces asolato è quello da  $9.69 \pm 0.01$  g.

La trave completata, ha una massa di  $25.26 \pm 0.01$  g, sempre per sottrazione, la colla utilizzata per l'assemblaggio dei due endpieces corrisponde a  $0.03 \pm 0.01$  g.

Un ulteriore controllo di qualità, che si è reso necessario durante i test, è stato quello di valutare quanto la trave assemblata fosse rettilinea. La trave è stata infatti assemblata a mano e per far combaciare i singoli elementi, in modo da essere incollati, sono stati leggermente forzati in posizione. Durante la fase di posizionamento quindi è possibile che si siano create delle tensioni interne alla struttura non trascurabili, che potrebbero averla deformata.

Per fare ciò la trave è stata posizionata sotto ad una macchina CMM con installato un visore ottico. L'oggetto è stato posizionato come mostrato in fig. 4.24. Una volta posizionato l'oggetto viene preso il riferimento del piano in granito. Per farlo il software della CMM (PC-DMIS) richiede almeno 3 punti da cui poi viene ricavato il piano di riferimento. La misura lungo l'asse verticale (l'asse Z) viene fatta mettendo a fuoco il sistema ottico installato al posto del tastatore (come per le misure dei singoli elementi). Sono stati presi 20 punti per

ogni lato lungo della trave e la misura è stata fatta per ognuno dei tre tralicci assemblati.

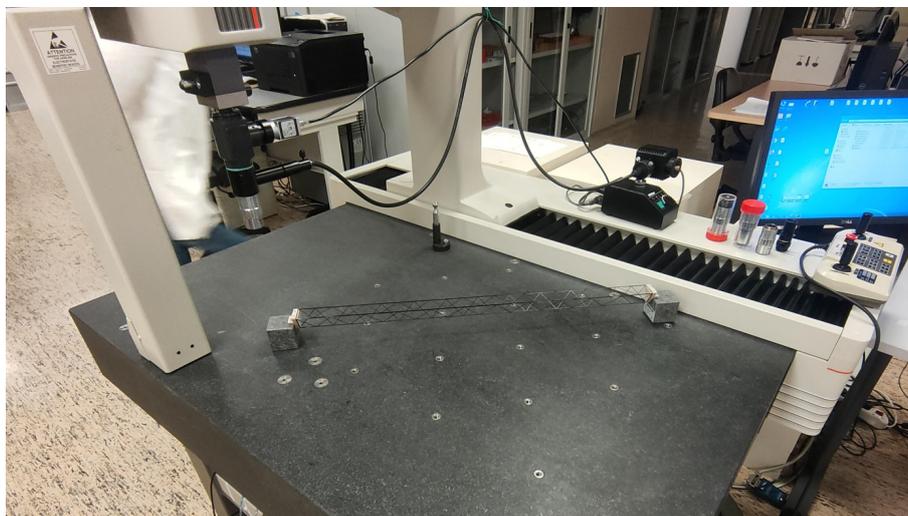


Figura 4.24: Apparato di misura per il test di flessione su tre punti. In questa configurazione abbiamo misurato la flessione, per verificare il comportamento della trave senza l'applicazione di alcun carico.

Se la trave fosse perfettamente rettilinea, ci si aspetterebbe che i punti presi durante le misure seguano una flessione dovuta al peso stesso della trave, che aumenta avvicinandosi al punto centrale. Tuttavia invece, come mostrato nei grafici di fig. 4.25, i punti non seguono un ordine preciso, indicando che la trave non è dritta. L'incertezza di misura della macchina è di 0.001 mm. Tuttavia, venendo utilizzata con un'ottica al posto del tastatore ed essendo la messa a fuoco ad opera dell'operatore e non automatica, abbiamo ritenuto più ragionevole tenere come incertezza un più conservativo 0.005 mm. Questa incertezza rimane comunque trascurabile rispetto alle misure.

#### 4.4.2 Test di flessione

Il primo test che è stato effettuato sulla struttura di supporto del modulo di VTX è il test di flessione. Tutti i moduli di VTX - così come anche quelli dell'attuale VXD - presentano una sovrapposizione, che serve per assicurare la copertura angolare in  $\phi$ , ma anche e soprattutto per mantenere l'allineamento della geometria del rivelatore di vertice.

A questo scopo quindi, è necessario creare una struttura di supporto il più rigida possibile, ma non solo, bisogna anche conoscere le caratteristiche flessionali della trave di supporto, così da rendere prevedibile e più precisa la posizione di partenza dei moduli durante la procedura di allineamento. Per questo motivo è stato eseguito un test di flessione sui tre prototipi assemblati. I risultati sono quindi stati confrontati con una simulazione agli elementi finiti (analisi FEM).

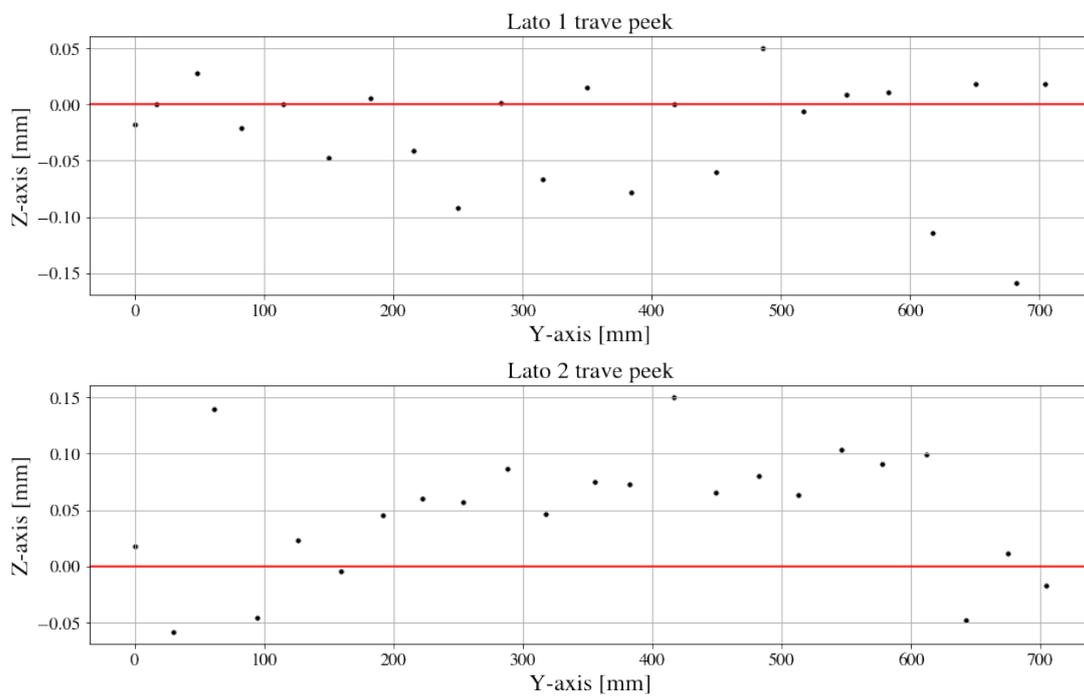


Figura 4.25: In alto la misura effettuata sul lato 1 della trave (rispetto all'immagine 4.24 il lato 1 è lo spigolo verso il fotografo) in basso sul lato 2 (lo spigolo verso il PC). I risultati degli altri due tralicci sono riportati in appendice 6.7, 6.8.

### Criticità del Test

I test sono stati fatti con differenti metodologie. Un primo test è stato effettuato utilizzando come carico una striscia di gomma flessibile, in modo che potesse simulare la distribuzione del carico che poi dovrà supportare la trave. La striscia di gomma ha una massa di  $51.57 \pm 0.01$  g distribuita su una lunghezza di  $355 \pm 1$  mm, una larghezza di  $40 \pm 1$  mm e uno spessore di  $3 \pm 0.05$  mm. Questa scelta è stata fatta per questioni di disponibilità di materiali all'interno dell'INFN e perché si prevede che il carico complessivo sarà di  $\sim 60$  g (stima conservativa). La seconda caratteristica di questo test da sottolineare è che le estremità della trave sono state bloccate ai blocchi di supporto con dei "clamp" apposti, come mostrato in fig. 4.26.

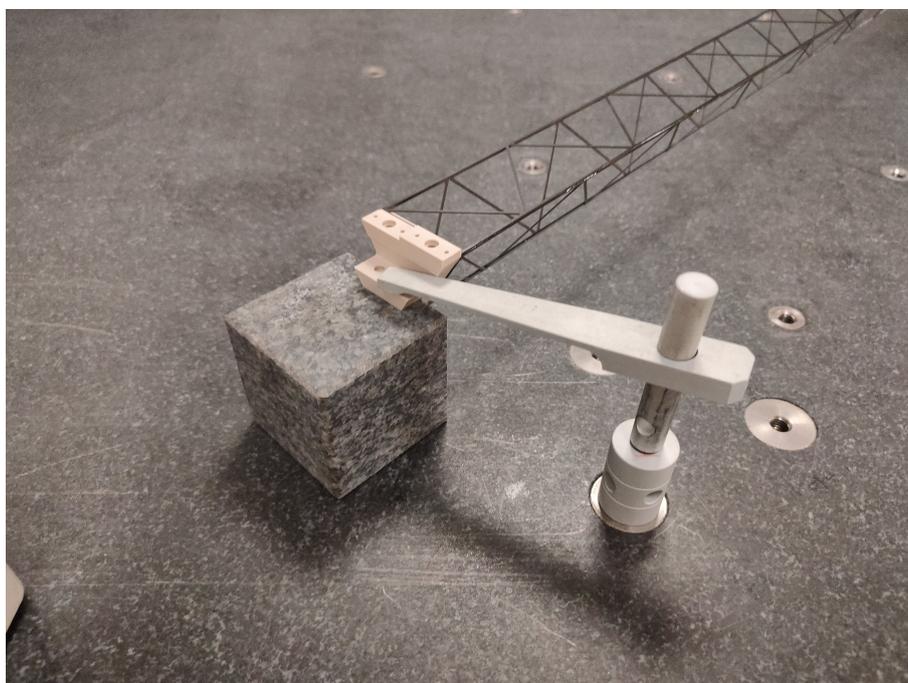


Figura 4.26: Sistema di fissaggio della trave al blocco di supporto tramite clamp. Trave posizionata a  $0^\circ$

Questo primo metodo di misura è stato scelto in quanto la prima analisi FEM effettuata è stata fatta impostando un collegamento rigido, tra la trave e il blocco di supporto (come se fosse bloccata).

Questo test viene eseguito misurando la distanza tra la base in granito della CMM e il punto centrale su entrambi i lati lunghi della trave. Viene quindi applicato il carico (semplicemente appoggiandolo alla parte superiore della struttura, corrispondente a  $0^\circ$ ) e, ripetuta la misura, per sottrazione viene estratto il valore di flessione. Anche in questo caso l'incertezza è di 0.005 mm, sia per la prima misurazione che per la seconda a carico applicato.

La metodologia utilizzata in questo test presenta alcune criticità. La prima è che la striscia di gomma utilizzata è di 355 mm e non copre quindi tutta la

lunghezza del traliccio di 704 mm. Il modulo completo invece avrà un carico distribuito lungo tutta la sua lunghezza. La seconda è che bloccando le estremità della trave risulta inverosimile pensare che non vengano applicate tensioni interne ad essa, torsioni o flessioni che risultano difficili da quantificare, ma che ragionevolmente non sono trascurabili ai fini del test flessionale.

Questo primo test è stato eseguito sostanzialmente per valutare la fattibilità della misura. A questo punto si è deciso quindi di migliorare la metodologia del test. In questo secondo metodo, come carico è stata utilizzata la stessa gomma, con misure differenti. Il carico applicato risulta quindi essere di  $60.7 \pm 0.01$  g, distribuiti su una lunghezza di  $525 \pm 1$  mm, una larghezza di  $30 \pm 1$  mm e lo stesso spessore di  $3 \pm 0.05$  mm. Queste è la distribuzione massima permessa con il tipo di materiale disponibile, non volendo superare i 60 g.

Il metodo di misurazione è uguale alla prima metodologia, ma in questo caso vengono misurati 5 punti differenti per ogni lato, il primo centrale mentre gli altri a distanza di 32 mm e 96 mm, simmetricamente rispetto al punto centrale. La stessa misura è stata ripetuta con la trave ruotata di  $180^\circ$  e  $90^\circ$  (rispetto alla posizione di default a  $0^\circ$ ) in modo da valutare eventuali differenze. Per poter applicare il carico con la trave posizionata anche a  $180^\circ$  e  $90^\circ$ , la striscia in gomma è stata incollata alla trave tramite biadesivo (la massa di 60.7 g comprende il biadesivo). Le misure sono quindi prima state eseguite tutte senza carico (a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ) e poi ripetute a carico applicato, questo per evitare possibili deformazioni durante il fissaggio del carico.

Sempre per evitare possibili errori di posizionamento, il piano di riferimento in questo caso, non è più la base in granito, ma diventa la superficie della trave stessa. Sono quindi stati presi quattro punti, ai quattro angoli del singolo elemento di trave (dove non ci si aspetta deformazione, in quanto coincidenti con l'appoggio della trave). La misura è stata quindi presa in riferimento al piano creato da questi quattro punti.

Infine, le estremità della trave non sono state bloccate. La trave in ogni fase della misurazione è stata semplicemente appoggiata. Questo per evitare di applicare possibili tensioni interne create dal sistema di fissaggio.

In questo modo, si è cercato di evitare il più possibile che la misura venisse condizionata da fattori esterni dovuti alla metodologia del test. Insieme alla metodologia del test sono state cambiate anche le impostazioni dell'analisi FEM. In particolare, in questa nuova simulazione, il carico è distribuito ugualmente al test. Inoltre le estremità della trave non sono più collegate rigidamente al blocco di supporto, ma sono collegate applicando una cerniera di collegamento. L'estremità della trave è quindi libera di ruotare (senza attrito) intorno allo spigolo del blocco di supporto.

### Risultati test flessionale

Il test effettuato con la prima metodologia ha riportato dei risultati discordanti. Come mostrato in tab. 4.2 infatti, la freccia creata dal carico sul traliccio fatto utilizzando gli elementi da 0.5 mm di spessore, è diversa nel caso della trave con

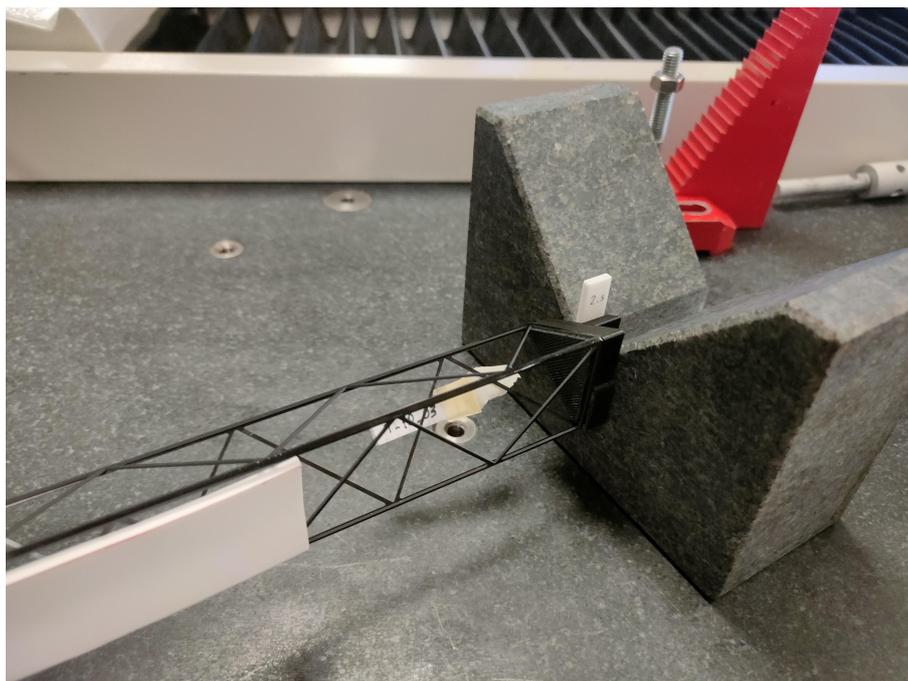


Figura 4.27: Sistema di appoggio della trave posizionata a 90°.

endpieces in PEEK rispetto a quella in ABS. Se le travi fossero strutturalmente uguali tra di loro non ci dovrebbe essere una differenza così marcata. La differenza delle caratteristiche meccaniche tra il PEEK e l'ABS non giustifica questa discordanza.

	PEEK 0.5	ABS 0.5	ABS 0.7
0°	0.341 ± 0.007 mm	0.429 ± 0.007 mm	0.258 ± 0.007 mm
90°	0.167 ± 0.007 mm	0.223 ± 0.007 mm	0.182 ± 0.007 mm
180°	0.281 ± 0.007 mm	0.371 ± 0.007 mm	0.277 ± 0.007 mm

Tabella 4.2: Risultati test di flessione primo metodo. I risultati sono discordanti tra loro. Oltre che tra le travi da 0.5 mm di spessore, a 90° la trave da 0.7 mm non dovrebbe avere una sagitta di valore più alto della trave da 0.5 mm in PEEK.

Il secondo metodo ha invece restituito dei risultati coerenti. Gli accorgimento presi in fase di preparazione del test, e durante lo svolgimento di esso, sono stati sensibili. Essendo fatta misurando cinque differenti punti, i risultati sono mostrati sotto forma di grafico in fig. 4.28.

In questo caso i risultati a 0° sono coerenti tra loro. La flessione delle travi da 0.5 mm sono simili, mentre la trave da 0.7 mm ha mostrato una flessione minore, come ci si aspettava.

Il test è quindi proseguito con le misure di flessione a 180°. In questo caso, la misura dei punti alla stessa distanza su entrambi i lati risulta impossibilitata dalla geometria della trave: i tralicci di rinforzo obliqui nascondono all'ottica il

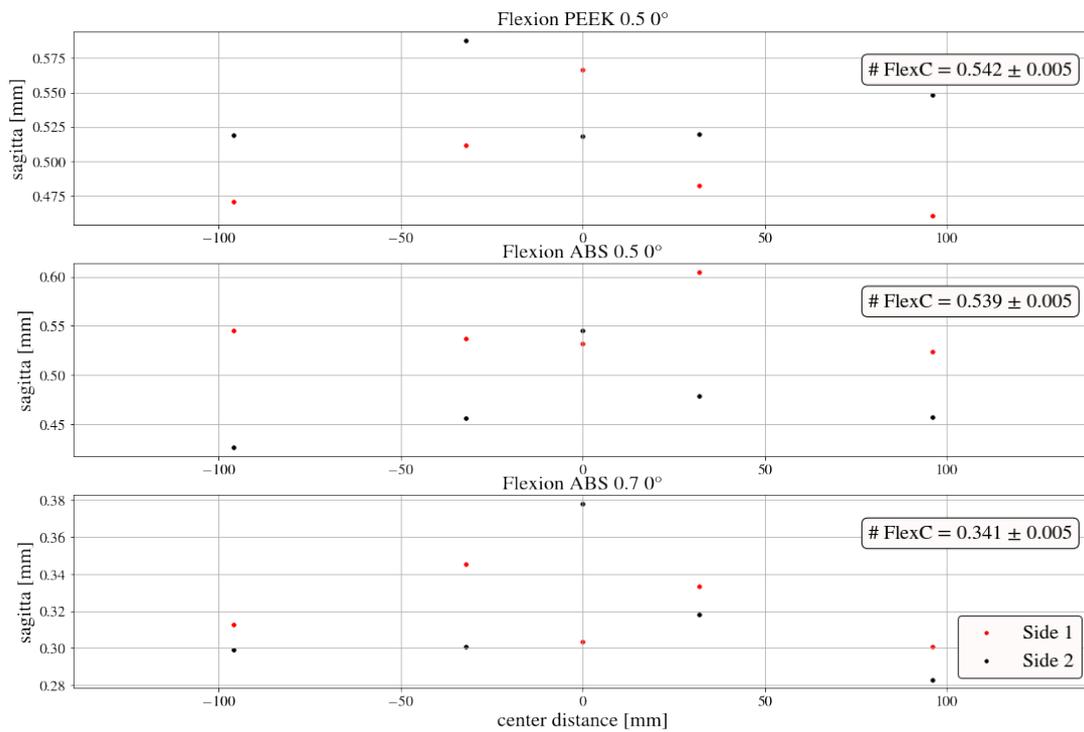


Figura 4.28: Risultati del test flessionale nella posizione di riferimento a 0°. Sull'asse X è rappresentata la distanza dal punto centrale del lato lungo della trave. Sull'asse Y sono rappresentate le sagitte corrispondenti. Il valore # FlexC, corrisponde alla media tra i due valori centrali.

punto di misura su uno dei due lati. Si è optato quindi per misure differenti a seconda del lato. I risultati sono mostrati in fig. 4.29.

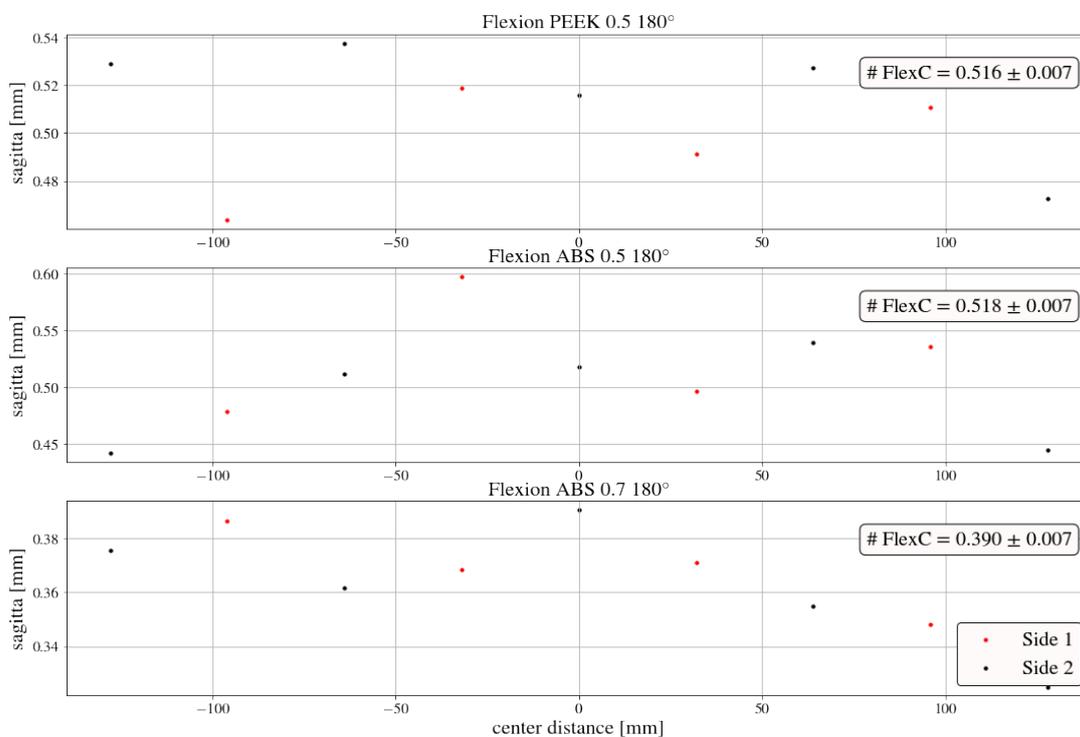


Figura 4.29: Risultati del test flessionale a 180°. Sull'asse X è rappresentata la distanza dal punto centrale del lato lungo della trave. Sull'asse Y sono rappresentate le sagitte corrispondenti. In questo caso il valore # FlexC, corrisponde semplicemente al valore centrale.

Anche in questo caso i risultati sono coerenti. Innanzi tutto i valori sono simili ai risultati del test fatto a 0°, inoltre sono anche compatibili tra di loro.

Il test si è quindi concluso con le misure di flessione a 90°. Con la trave posta a 90° risulta un solo lato da misurare: lo spigolo superiore risultante dalla rotazione della trave. Tuttavia, questo spigolo non è orizzontale, ma inclinato di 60° rispetto al piano orizzontale (lato di un triangolo equilatero ruotato di 90°). Questa caratteristica rende meno affidabile la misurazione essendo impossibile recuperare l'esatto punto di misura, prima e dopo l'applicazione del carico.

Per ovviare a questo problema, si è cercato di recuperare il punto esatto prima e dopo l'applicazione del carico misurando lungo lo spigolo della trave. Tuttavia, il laminato di carbonio tagliato ad acqua presenta diverse imperfezioni lungo la linea di taglio (fare riferimento alla fig. 4.11). Tra la prima e la seconda misura c'è quindi il rischio di incappare in un punto di valle o di cresta della linea di taglio e quindi sfalsare la misura. Purtroppo anche questo problema è difficilmente quantificabile.

I risultati sono mostrati in fig. 4.30.

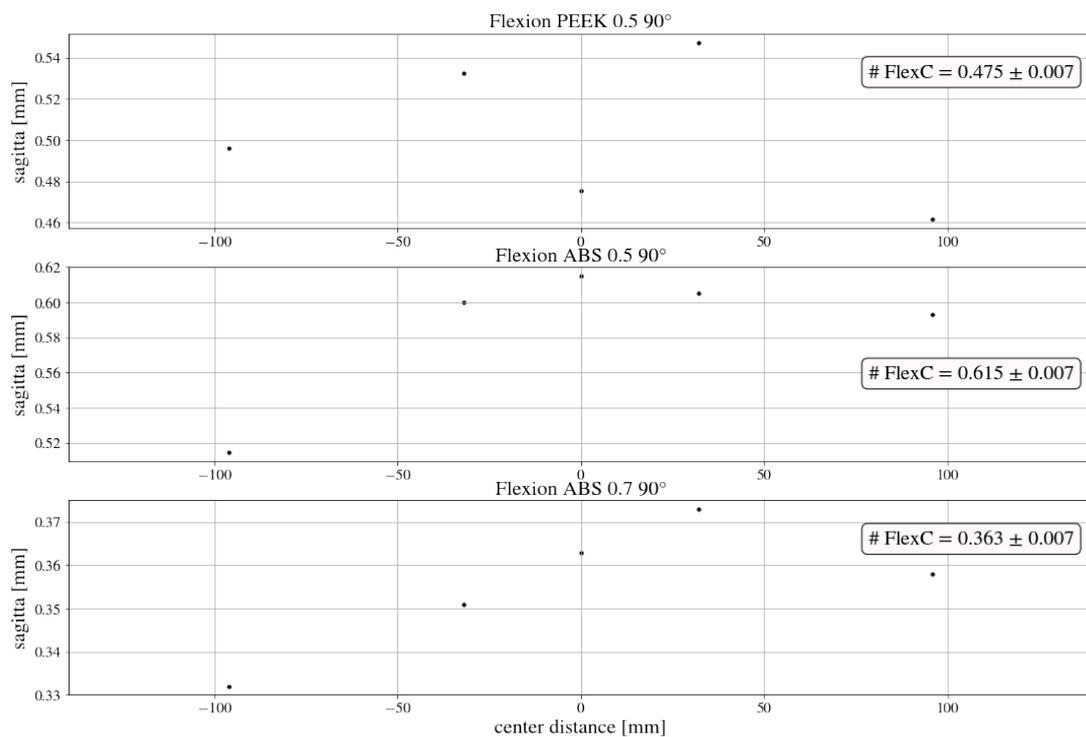


Figura 4.30: Risultati del test flessionale a 90°. Sull'asse X è rappresentata la distanza dal punto centrale del lato lungo della trave. Sull'asse Y sono rappresentate le sagitte corrispondenti. Anche questo caso il valore # FlexC, corrisponde semplicemente al valore centrale.

Nel caso a  $90^\circ$  i risultati mostrano subito una incompatibilità tra le due travi da 0.5 mm. Dai risultati sembrerebbe che i problemi esposti sopra abbiano riguardato solo la misura del punto centrale sulla trave in PEEK.

A questo punto i risultati ottenuti sono stati confrontati con le analisi FEM. Anche in questo caso sono sorte alcune criticità. La sezione seguente è dedicata proprio a questo confronto.

### 4.4.3 Confronto con modello simulato

Un'analisi agli elementi finiti (FEA) si basa sul metodo degli elementi finiti (FEM), che è una tecnica numerica. Tramite questa tecnica numerica, problemi complessi descritti da equazioni alle derivate parziali vengono approssimati descrivendoli con equazioni algebriche. Questo tipo di analisi trova applicazioni in molti ambiti in cui gli oggetti da analizzare hanno geometrie complesse, ma non solo. Un'analisi agli elementi finiti trova applicazioni anche in tutti quegli ambiti in cui la precisione dell'analisi può essere variabile, come ad esempio un crash test, in cui ci si interessa soprattutto del punto di impatto. In tutti i casi in cui un'analisi nel continuo risulta impossibile o inapplicabile si può ricorrere ad un'analisi agli elementi finiti.

Nel nostro caso, l'analisi agli elementi finiti è stata usata per simulare il test di flessione e anche per il test vibrazionale di cui parlerò nella prossima sezione.

#### Criticità del modello simulato

La simulazione di una struttura composita presenta delle criticità intrinseche. Le caratteristiche di un oggetto in materiale composito dipendono sia dalle specifiche dei materiali che lo compongono, sia dai processi con cui viene prodotto: il tipo di cura che viene fatta ad esempio (temperatura, pressione, tempo di cura ecc), determina profondamente le caratteristiche del prodotto finito. Solitamente vengono creati dei provini appositi per caratterizzare il materiale di partenza. I risultati delle caratterizzazioni vengono quindi inseriti all'interno del software di simulazione (nel nostro caso ANSYS) e vengono utilizzate per le simulazioni dell'oggetto finito.

Nel nostro caso, la caratterizzazione del materiale di partenza non è ancora stata fatta. Le caratteristiche inserite all'interno di ANSYS derivano dalle specifiche dei materiali che compongono il composito. È stato creato su ANSYS un "ply" composto da fibra M46J da  $130 \text{ g/m}^2$ , impregnata di resina epossidica al 60%. Le specifiche meccaniche derivano dalle caratterizzazioni fatte dalla Torayca, l'azienda produttrice (in appendice sono presenti le specifiche utilizzate, fig. 6.10). ANSYS offre quindi un tool, chiamato ACP. ACP, partendo dalle caratteristiche dei materiali che compongono un ply, si occupa di creare un materiale composto da quattro plies disposti ortogonalmente in maniera simmetrica:  $0^\circ\text{-}90^\circ\text{-}90^\circ\text{-}0^\circ$ . Tuttavia, la caratterizzazione di un materiale fatta in questo modo, derivando da semplici caratteristiche a priori e non da valori empirici post produzione, è per forza di cose imprecisa.

Le condizioni al contorno inoltre, non sempre sono semplici da riprodurre all'interno della simulazione. Nel nostro caso ad esempio, gli endpieces sono collegati al blocchetto di supporto con un vincolo che gli permette di ruotare liberamente attorno allo spigolo del supporto, ma non di scorrere (vedi fig. 4.31). L'attrito tra gli endpieces e il blocchetto di supporto non è stato implementato. Il collegamento utilizzato è quindi una semplice cerniera, che non corrisponde perfettamente alla realtà.

## Risultati

Il modello simulato corrisponde a metà della trave. La trave, essendo simmetrica, non ha bisogno di essere simulata per intero, è sufficiente utilizzare i risultati ottenuti dai singoli "nodi" (gli elementi che compongono la simulazione) e specchiarli sull'altra metà di trave. Simulare l'intera trave vorrebbe dire far fare al calcolatore due volte gli stessi calcoli. Il carico è stato applicato allo stesso modo di come è stato applicato nei test in laboratorio. Un frame della simulazione è riportato in fig. 4.31

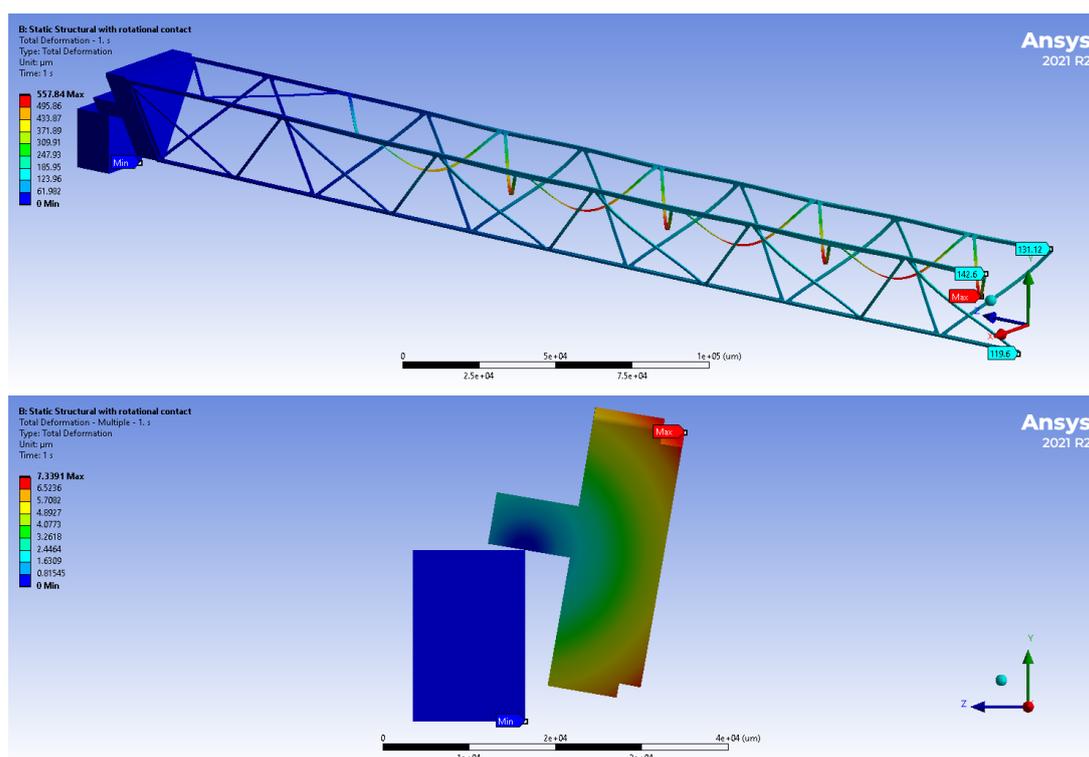


Figura 4.31: In alto il risultato della simulazione del test di flessione. In basso un'immagine che rappresenta il vincolo applicato nella simulazione, tra endpieces e blocchetto di supporto.

I risultati mostrano una flessione massima di 0.142 mm e 0.131 mm sui due lati della trave, nel loro punto centrale. La deformazione massima si ha nei punti centrali dei supporti di rinforzo centrali, dove si arriva ad oltre mezzo

millimetro di deformazione. La deformazione di quella parte delle trave, non è stata misurata in laboratorio in quanto il carico copre il punto di misurazione.

Questi risultati sono discordanti rispetto ai risultati ottenuti dai test in laboratorio (di circa 400-500  $\mu\text{m}$ ). Bisogna tenere in considerazione però che i tralicci assemblati sono oggetti estremamente delicati e sono stati incollati a mano. In alcuni punti inoltre, sono state applicate delle forze esterne durante l'incollaggio per far combaciare i singoli elementi che compongono il traliccio finito. Queste forze possono quindi aver creato delle tensioni interne alla trave non trascurabili, ma che sono tuttavia impossibili da quantificare. Come mostrato dai controlli di qualità infatti, le travi sono tutt'altro che dritte e risulta inoltre difficile valutare quanto siano ruotate, oltre che non rettilinee nella loro direzione longitudinale. Queste considerazioni, insieme a quelle espone nel paragrafo precedente sulla simulazione, rendono il risultato della simulazione comunque accettabile. Sicuramente però in futuro andranno migliorate le condizioni della simulazione, oltre che creato un protocollo più stringente d'assemblaggio dei moduli.

Nel loro insieme, si può comunque concludere che i tralicci di supporto hanno dato risultati incoraggianti nei test di flessione. Una flessione dell'ordine di 400-500  $\mu\text{m}$ , è infatti abbondantemente all'interno delle specifiche richieste per questi moduli. Un concetto di sistema di supporto come quello proposto in questa sezione è quindi una strada che ha senso venga approfondita e ottimizzata ulteriormente.

#### 4.4.4 Test vibrazionale

Il secondo test per caratterizzare il modulo di VTX è stato il test vibrazionale. Un test di questo tipo si rende necessario essenzialmente per due ragioni. La prima è che il centro di ricerca KEK è localizzato in un'area ad alta intensità sismica, avendo mediamente una scossa di terremoto ad alta intensità a settimana. Si rende necessario quindi eseguire un test vibrazionale per essere sicuri che i componenti di VTX abbiano delle frequenze proprie di risonanza molto più alte delle frequenze caratteristiche dei terremoti.

Il secondo motivo è logistico: è molto improbabile che l'assemblaggio dei singoli moduli avvenga direttamente sul sito dell'esperimento. Durante il trasporto, gli oggetti che compongono VTX subiranno delle vibrazioni tipiche dei trasporti via terra, via nave, o via aereo. Bisogna quindi essere certi che le frequenze di risonanza del modulo di VTX non cadano all'interno delle regioni di frequenza presenti durante il trasporto.

Come per il test flessionale, anche in questo caso si è svolto tutto all'interno dei locali INFN della sezione di Pisa. Per questo test è stato utilizzato esclusivamente il modulo con gli endpieces in PEEK, in quanto le differenti rigidità meccaniche dell'ABS e del PEEK creerebbero differenti frequenze normali da parte del modulo. Dato che in definitiva il prototipo è stato progettato con gli endpieces in PEEK, testare i tralicci con gli endpieces in ABS sarebbe stato inutile.

Il test avviene tramite una macchina che crea una sollecitazione con una determinata accelerazione impostabile. Il tipo di sollecitazione che la macchina è in grado di dare è sinusoidale prolungata nel tempo, impulsiva, o random in frequenza. Nel nostro caso è stata utilizzata solo la sollecitazione sinusoidale con un range di frequenza tra i 10 Hz e i 1000 Hz. L'accelerazione impressa dal macchinario nel nostro caso varia da 0.1 g a 0.6 g, dove 1 g corrisponde all'accelerazione gravitazionale. Questi valori sono stati scelti essendo gli stessi valori utilizzati a suo tempo per i test vibrazionali dei moduli di SVD. Nel nostro test il macchinario utilizzato è il "Vibrational Test System TV 5220-120".

Inviata la "sollecitazione", la macchina legge la risposta tramite un accelerometro fissato in maniera rigida all'oggetto da verificare e ne salva i dati.

La macchina va collegata in maniera rigida al traliccio, in modo che il sistema di supporto non influenzi la risposta in frequenza del traliccio. Per farlo, l'officina meccanica dell'INFN di Pisa ha realizzato una struttura di supporto ad hoc. L'oggetto, ricavato dal pieno da un blocco unico di alluminio, è mostrato in fig. 4.32.

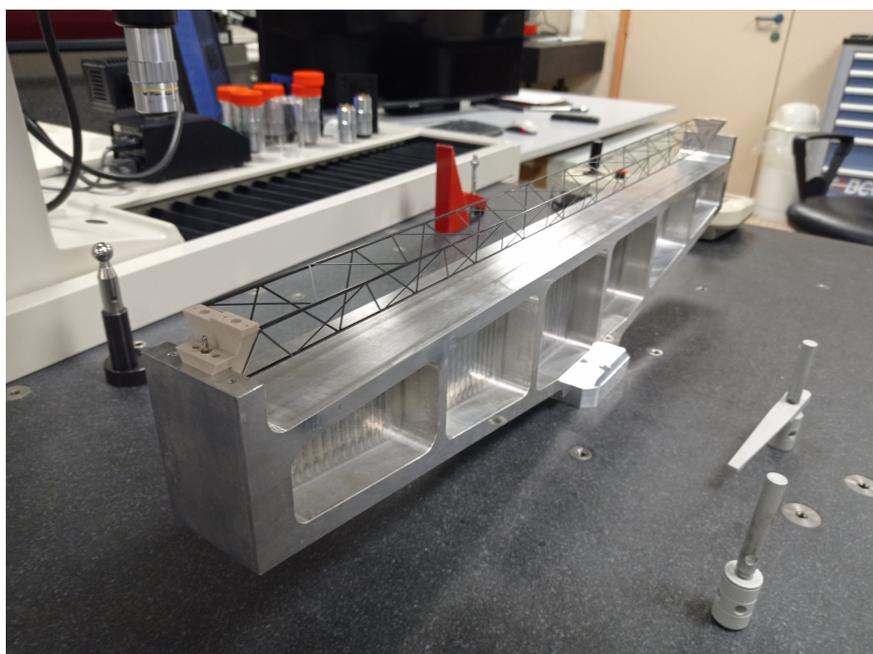


Figura 4.32: Supporto in alluminio per il test vibrazionale con installato il traliccio da testare.

Per prima cosa è stato effettuato un test con il solo traliccio di supporto in alluminio. Questo per verificare la fattibilità del test, ma soprattutto per conoscere i modi normali di vibrazione del supporto. In questo caso l'accelerometro è stato quindi fissato direttamente sul supporto. Il risultato di questo primo test è mostrato in fig. 4.33

Nel grafico è mostrata la prima frequenza di risonanza a  $\sim 300$  Hz. La risposta dell'accelerometro in questo caso è molto precisa in quanto la struttura, essendo molto rigida, è in grado di seguire perfettamente le sollecitazioni date

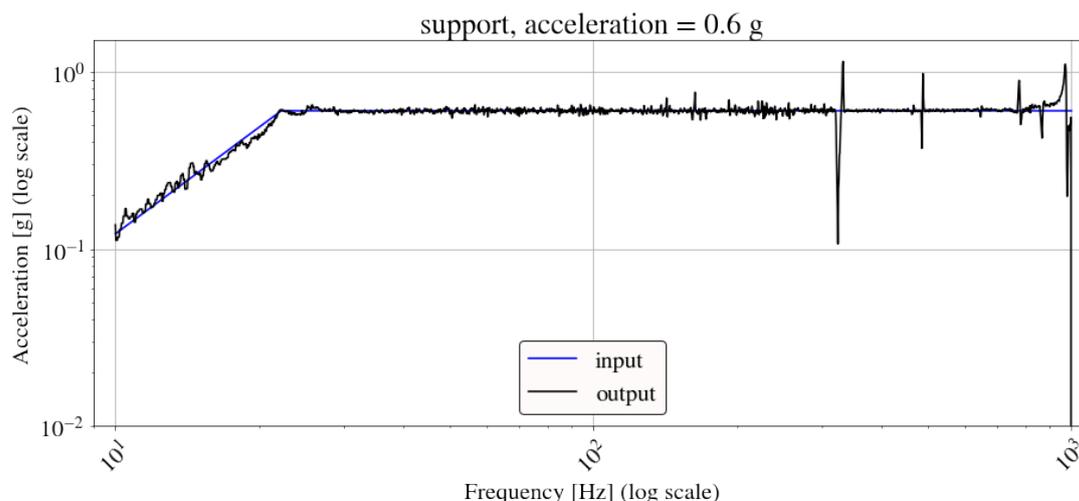


Figura 4.33: Risultato test vibrazionale del solo supporto in alluminio. La linea blu mostra l'input di sollecitazione dato dalla macchina, mentre la linea nera rappresenta l'accelerazione in output misurata dall'accelerometro. Le spike si mostrano nelle frequenze di risonanza del supporto. La prima risonanza risulta quindi essere intorno ai 300 Hz.

dalla macchina, tranne nei punti esatti di risonanza. Come vedremo, non si può dire lo stesso della trave.

Le frequenze dei terremoti possono variare tra 1 Hz e i 25 Hz, sotto ai 10 Hz lo "shaker" non ci permette di effettuare test, inoltre ci sembra ragionevole pensare che non ci siano frequenze di risonanza sotto ai 10 Hz. Per quanto riguarda le frequenze tipiche durante il trasporto, queste vengono fornite direttamente dalle compagnie di trasporto. In fig. 4.34, a titolo di esempio, è mostrato lo spettro in frequenze tipico, che un oggetto deve sopportare durante un trasporto intercontinentale con la compagnia FedEx.

Dalla fig. 4.34 si evince che frequenze di risonanza sotto ai 100 Hz potrebbero risultare problematiche durante il trasporto via aria.

A questo punto abbiamo preparato il test del traliccio, bloccandolo al supporto in alluminio con due viti M4 per ogni estremità. L'accelerometro è stato posto nel punto centrale del traliccio, sul lato dove le aste di rinforzo non convergono, come mostrato in fig. 4.35

A questo punto abbiamo fatto partire il test. Anche in questo caso abbiamo dato come input un'onda sinusoidale tra i 10 Hz e i 1000 Hz con un'accelerazione massima di 0.6 g. Lo "scan" in frequenza dura circa 3 minuti, i risultati sono mostrati in fig. 4.36.

I risultati del test fatto sulla trave sono più difficili da interpretare. Essendo molto meno rigida del supporto in alluminio, la trave tende ad oscillare più facilmente in risposta ad una sollecitazione esterna. Attorno ai 100 Hz si nota che l'accelerometro legge una risposta sensibilmente più marcata rispetto all'input dato. Tuttavia, vista l'ampiezza molto limitata, non si è ritenuto di considerarlo una vera e propria frequenza di risonanza della trave. La prima frequenza di

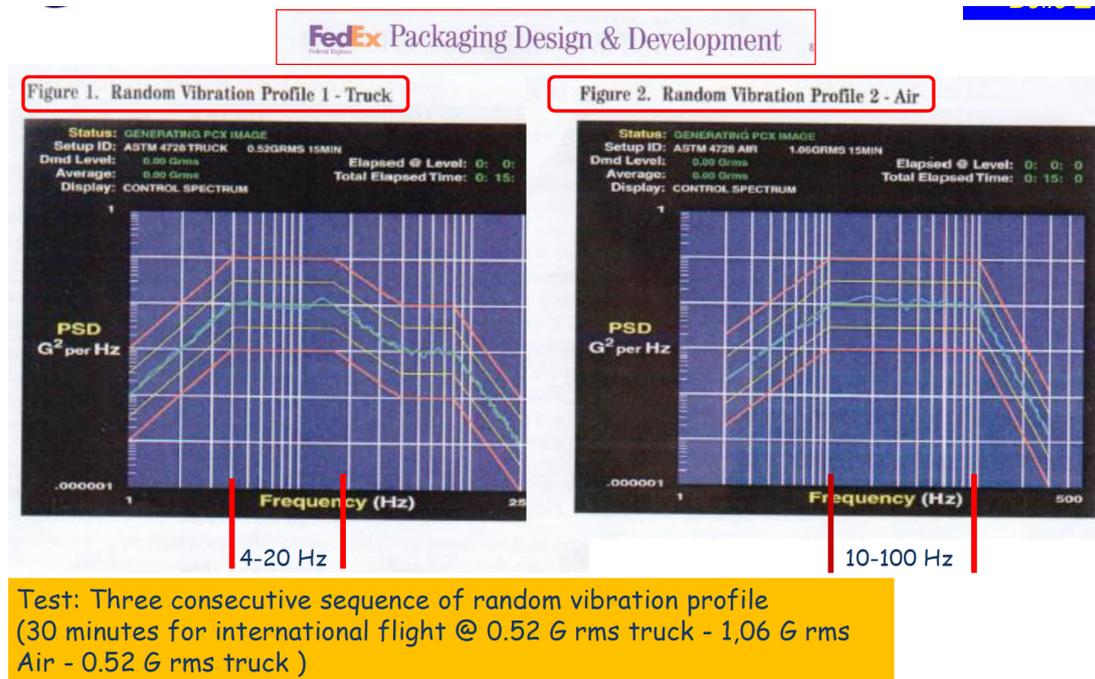


Figura 4.34: Frequenze di trasporto, fornite dalla compagnia di trasporti FedEx. A sinistre le frequenze tipiche di un trasporto su gomma, a destra quelle di un trasporto tramite aereo.



Figura 4.35: A sinistra il posizionamento dell'accelerometro, fissato al traliccio utilizzando della colla a caldo. A destra l'apparato di misura con supporto di alluminio e traliccio fissati allo shaker che sottopone la struttura a vibrazione.

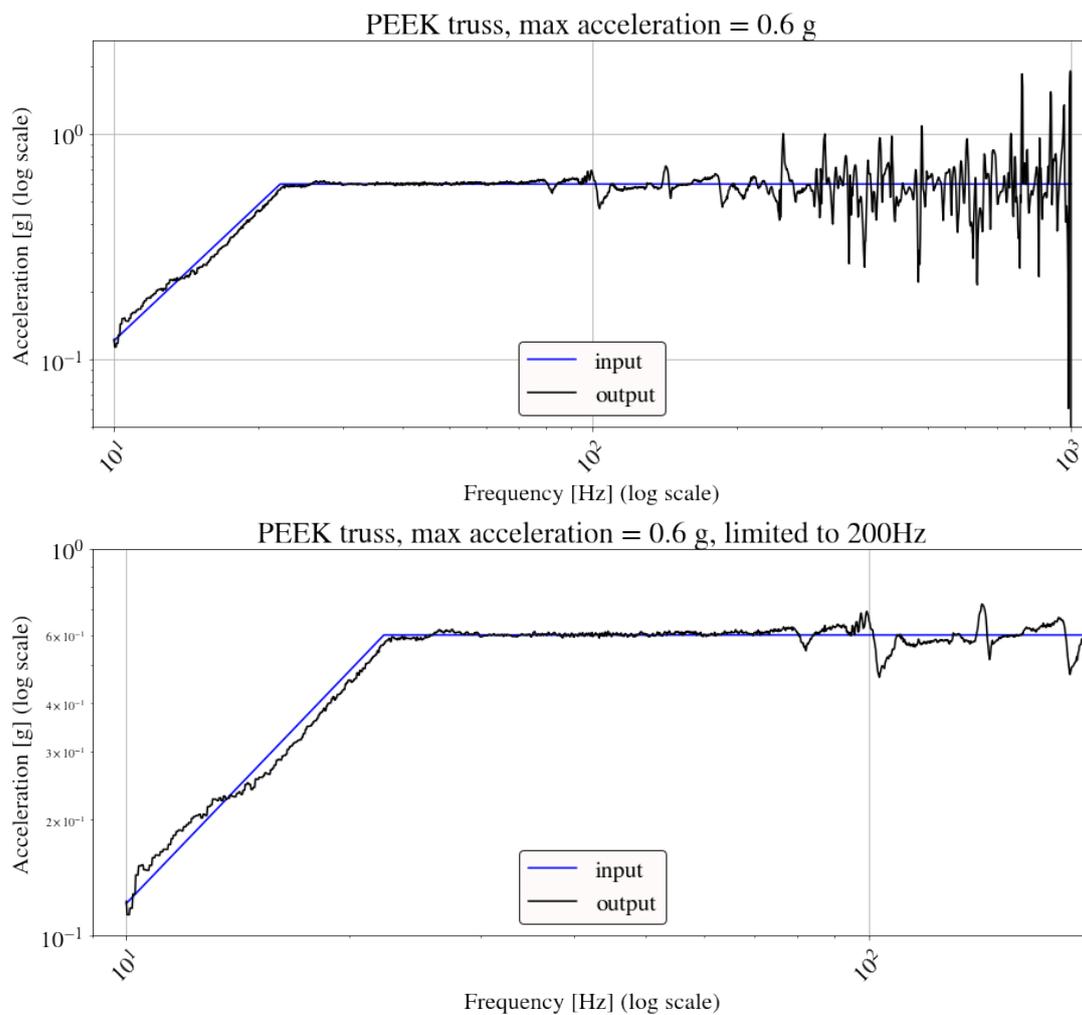


Figura 4.36: In alto i risultati del test tra 10 Hz e 1000 Hz. In basso lo stesso grafico limitato alle frequenze tra 10 Hz e 200 Hz. La linea blu corrisponde alla sollecitazione data in input dalla macchina, la linea nera all'accelerazione letta dall'accelerometro.

risonanza vera e propria, è stata identificata in un intorno di 250 Hz, al di sopra dei limiti di attenzione imposti.

Come nel caso del test di flessione, questi risultati sono stati confrontati con un'analisi agli elementi finiti.

### Confronto col modello simulato

Per l'analisi FEM è stato utilizzato lo stesso modello creato per la simulazione del test flessionale. Il modello è mostrato in fig. 4.37. Nel modello è presente solo metà della struttura, avendone sfruttato la simmetria.

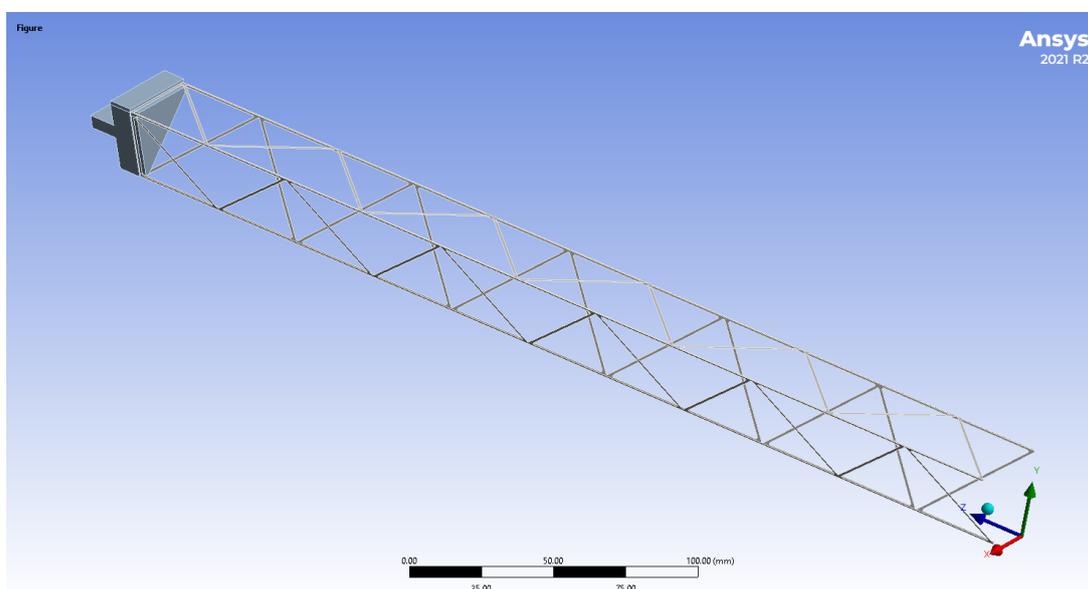


Figura 4.37: Modello ANSYS del traliccio.

Applicando alla simulazione le stesse condizioni al contorno applicate al test, quindi tra i 10 Hz e i 1000 Hz, si ottengono i risultati mostrati in fig. 4.38.

I risultati di questa simulazione mostrano che la prima frequenza di risonanza si trova in un intorno di 200 Hz. Anche se non sono perfettamente sovrapponibili con i risultati del test vero e proprio, possiamo comunque ritenerci soddisfatti della simulazione, ricordando che la prima risonanza del test era in un intorno di 250 Hz.

Possiamo concludere quindi che il test vibrazione del prototipo di modello per VTX ha dato un riscontro positivo. Non ci dovrebbero essere problemi, né per quanto riguardano i terremoti a KEK, né per quanto riguarda l'eventuale trasporto del modulo.

Nella prossima sezione passerò quindi alla caratterizzazione elettrica del circuito flex che farà anche esso parte del modulo del layer 5 di VTX.

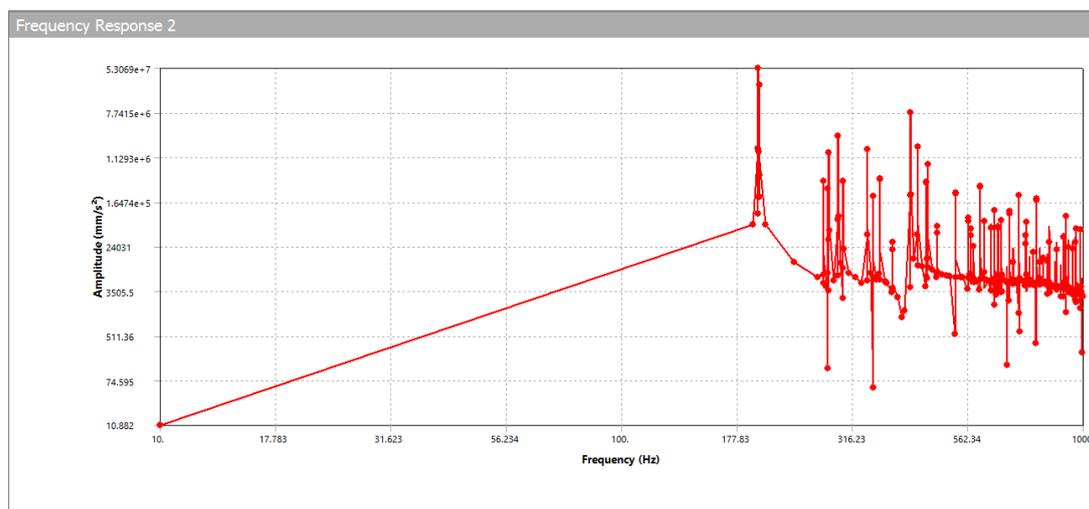


Figura 4.38: Risultati della simulazione ANSYS. Il grafico mostra l'accelerazione misurata sul traliccio in funzione della frequenza.

## 4.5 Caratterizzazione elettrica del circuito flex

Il prototipo di circuito flex in rame è stato testato per verificarne le caratteristiche elettriche. L'interesse dei due test proposti in seguito è quello di verificare il disturbo al segnale introdotto dal circuito. Ricordando che la larghezza di banda attesa per il sensore sarà di circa  $\sim 320$  Mbits/s, significa che il circuito deve essere in grado di mantenere leggibile un segnale di un'onda quadra a  $\sim 160$  MHz. I test qui proposti sono stati fatti utilizzando le linee di trasmissione più lunghe (quindi quelle che più disturbano il segnale) del circuito flex.

### 4.5.1 Test diagramma ad occhio

Il primo test che è stato eseguito è quello del diagramma ad occhio. In questo tipo di test, un'onda quadra viene inserita ad uno dei capi del circuito, mentre all'altro capo viene collegato un oscilloscopio. Impostando l'oscilloscopio per questo tipo di test, il software interno sovrappone la parte alta e bassa dell'onda quadra. In questa configurazione, un'onda quadra ideale risulterebbe come una serie infinita di rettangoli disposti su una linea, uno a fianco all'altro. Un'onda quadra reale - e quindi deformata - invece risulta come una serie infinita di forme simili a quelle di un occhio appunto. Il circuito ricevente sarà in grado di distinguere gli 0 dagli 1 se le linee del segnale saranno ben separate, cioè l'"occhio" sarà sufficientemente aperto.

Nel nostro caso è stata utilizzata in ingresso un'onda quadra da 250 MHz, all'altro capo del circuito invece è stato collegato l'oscilloscopio SDA 808Zi-A, prodotto dalla Teledyne Lecroy. In fig. 4.39 è mostrato l'apparato di misura utilizzato.

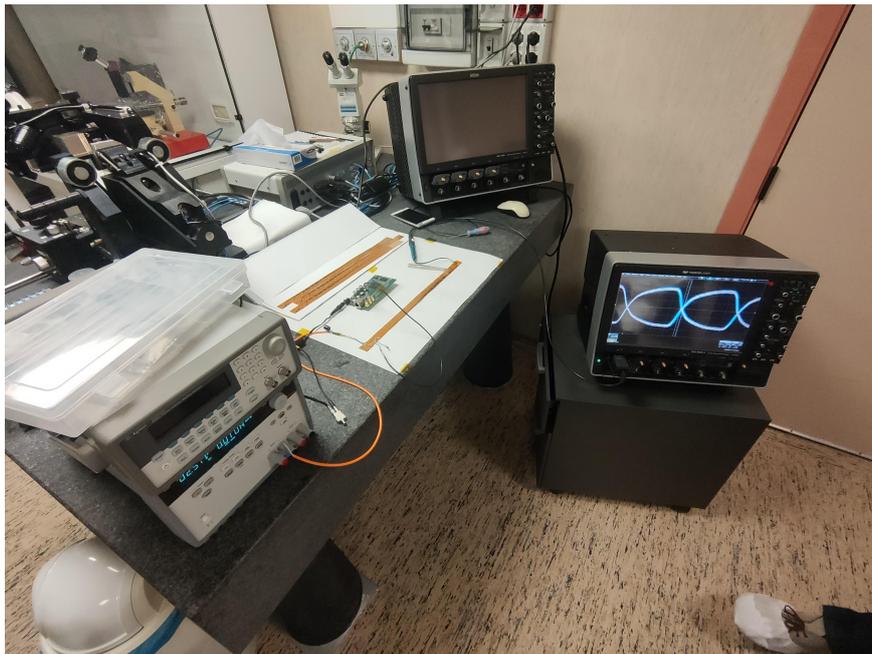


Figura 4.39: Apparato di misura per il test del diagramma ad occhio.

### Risultati test diagramma ad occhio

I risultati ottenuti dal test del diagramma ad occhio sono mostrati in fig. 4.40.

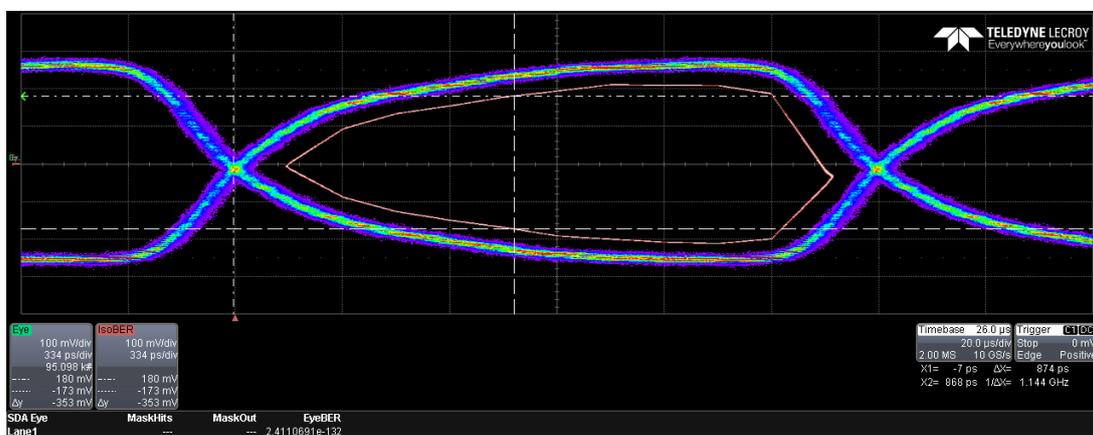


Figura 4.40: Risultati test diagramma ad occhio. Il grafico mostra la tensione in funzione del tempo, misurata all'estremità del circuito opposta alla sorgente.

La figura mostra che il segnale è ancora perfettamente leggibile a 250 MHz e che il livello basso da quello alto è ben distinguibile. La linea rossa interna all'occhio corrisponde al più piccolo occhio possibile con una probabilità di errore compresa tra  $10^{-19}$  e  $10^{-21}$  (le due linee corrispondenti sono quasi sovrapposte). Questo significa quindi che, mediamente, avviene un diagramma ad occhio piccolo come quello mostrato dalla linea rossa, ogni  $10^{21}$  picchi d'onda.

Il protocollo di trasmissione dati che verrà probabilmente utilizzato, è il protocollo LVDS. Nel protocollo LVDS un segnale viene considerato 1 quando supera i 100 mV e zero quando rimane al di sotto di -100 mV. Con questo limite di ampiezza si è stimato che il segnale possa rimanere leggibile fino ad un bit rate di 670 Mbits/s, molto al di sopra della soglia di  $\sim 320$  Mbits/s posta come obiettivo.

#### 4.5.2 Test di attenuazione

Il secondo test che è stato eseguito è stato la misura di attenuazione del circuito. Il test viene fatto dando in input al circuito un'onda quadra con una frequenza compresa tra gli 0 Hz e 5 GHz, al capo opposto del circuito viene letta l'attenuazione del segnale. L'attenuazione è definita come  $A = -10\log_{10}(P_{out}/P_{in})$  dove  $P$  indica la potenza.

Nel nostro caso, è stato utilizzato un oscilloscopio Agilent DCA-X 86100D, creato appositamente per questo tipo di misure. Lavorando a frequenza così alte l'oscilloscopio deve prima di tutto essere calibrato. Per farlo viene fatto un primo test con i soli cavi e due interfacce cavo-flex saldate tra di loro, creando quindi una condizione equivalente a quella del test, ma senza il circuito flex nel mezzo. Questa configurazione è mostrata in fig. 4.41.

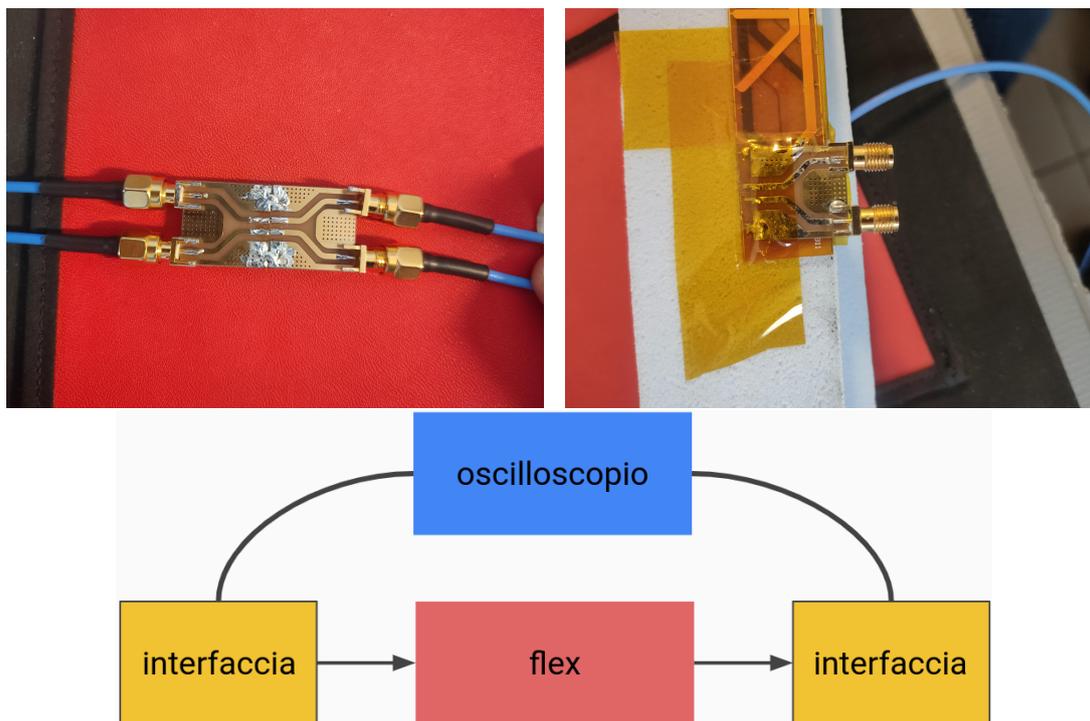


Figura 4.41: In alto a sinistra le due interfacce saldate tra loro per simulare il disturbo creato dai cavi e dall'interfaccia, necessario a calibrare il test. In alto a destra l'interfaccia cavo-flex di input saldata sul circuito flex, all'altro capo è presente una seconda interfaccia identica che funge da output flex-cavo. In basso lo schema di come è configurato il set-up del test.

A questo punto, utilizzando altre due interfacce identiche, è stato inserito nel mezzo dell'apparato il circuito flex. Uno schema di come viene impostato il test è mostrato in fig. 4.41. A questo punto viene inviato lo stesso segnale all'apparato e ne vengono salvati i dati.

### Risultati test di attenuazione

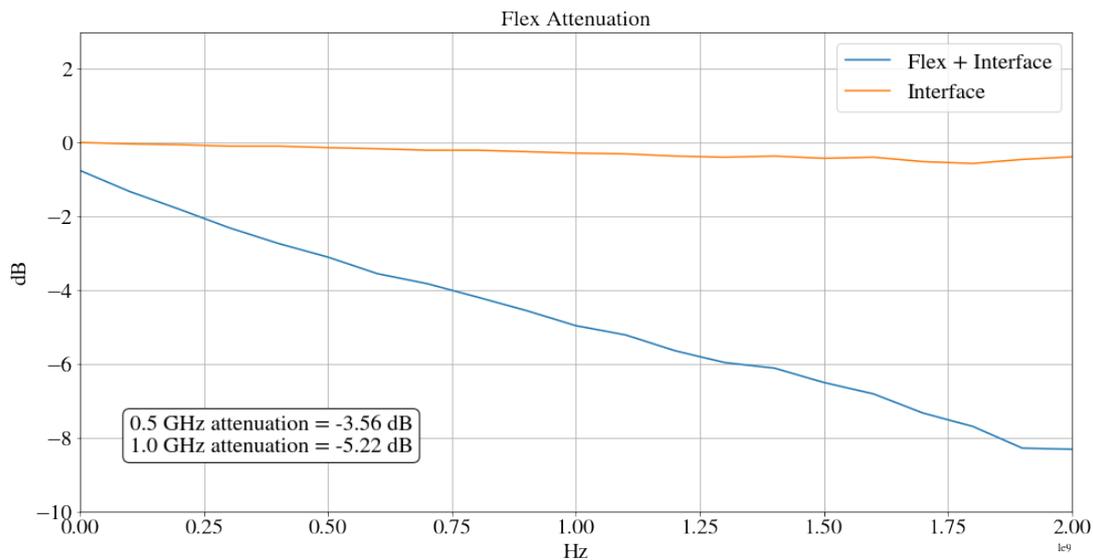


Figura 4.42: Risultati test di attenuazione del circuito flex. L'attenuazione è misurata in dB in funzione della frequenza.

In figura 4.42 è mostrato che a 500 MHz l'attenuazione è di -3.56 dB, ovvero circa il 66% del segnale di input, che non risulta comunque un problema in quanto i sensori OBELIX lavoreranno sotto ai 200 MHz. In questi risultati bisogna però tenere in considerazione che il test è stato fatto con il circuito in rame. L'alluminio invece aumenterebbe la resistenza del circuito da  $\sim 16 \Omega$  a  $\sim 26 \Omega$  in continua. Per questo motivo il circuito in alluminio dovrà essere ridisegnato per mantenere la stessa caduta di potenziale di 100 mV. Lo stesso test dovrà essere dunque ripetuto.

I risultati ottenuti con il circuito in rame ci lasciano comunque ragionevolmente ottimisti riguardo ai risultati dei futuri test sul circuito in alluminio.

# Capitolo 5

## Conclusioni

In questa tesi, articolata su due argomenti principali tra loro collegati, è stata proposta in primo luogo un'analisi del materiale del rivelatore di vertice di Belle II (VXD) attraverso la ricostruzione di fotoni convertiti in coppie  $e^+e^-$ . Nella seconda parte invece è stato descritto lo stato dell'arte del nuovo rivelatore di vertice VTX, concentrandosi in particolare sulla caratterizzazione dei prototipi per i moduli di VTX L5 (il layer 5, il più esterno).

L'analisi è stata eseguita ricostruendo i vertici di produzione di coppie  $e^+e^-$  da parte di fotoni ad alta energia, confrontando così il contenuto in materiale di VXD simulato, con il material budget di VXD ricavato dai dati. Il confronto ha mostrato che in alcune parti la geometria della simulazione è sottostimata, in termini di lunghezza di radiazione. In particolare i risultati hanno mostrato che il material budget della zona di supporto dei 2 layers di PXD nella zona backward è sottostimato nel MC. La seconda differenza mostrata dall'analisi è legata alla distribuzione dei dati e del MC in funzione della distanza dal punto di interazione. Mentre il MC concentra le hits vicino alla zona di interazione, i dati tendono a distribuirle in maniera più uniforme allontanandosi dall'IP (Interaction Point). Questa differenza nella geometria della simulazione rispetto a quella reale non è ancora stata del tutto chiarita.

L'analisi può essere approfondita aumentando la statistica. Nel mio caso infatti il confronto nelle variabili locali dei sensori è stato limitato dalla bassa statistica. Per farlo ho modificato il software BASF2, inserendo delle variabili ad hoc, al costo di far lavorare in locale il software, senza quindi utilizzare la grid con la sua potenza computazionale. Al momento è stata fatta la richiesta di inserire le mie modifiche nel branch principale della repository. Una volta approvata, potrà essere aumentata la statistica utilizzando la grid.

Ulteriori approfondimenti su questo tipo di analisi andranno eseguiti da parte della collaborazione. Oltre alle differenze nel material budget, l'analisi ha evidenziato alcuni problemi nella ricostruzione degli impulsi. In alcuni casi infatti l'impulso della particella madre (nel mio caso i fotoni) viene ricostruito con verso opposto. La causa è stata ricondotta all'errata assegnazione delle cariche degli  $e^+e^-$ , che sporadicamente sembrerebbero essere invertite. A tale scopo sono ini-

ziate delle valutazioni ricostruendo candidati  $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  per i quali, come per la produzione di coppie  $e^+e^-$ , il vertice di produzione non è nell'IP.

Questo lavoro di confronto del material budget tra dati e MC, anche se ancora preliminare, fornisce indicazioni importanti su dove intervenire e rappresenta una metodologia utilizzabile per rendere la descrizione del rivelatore nel MC più realistica.

Gli studi fatti sui prototipi dei moduli del layer 5 di VTX hanno evidenziato la fattibilità del progetto. In particolare il test di flessione sulla struttura di supporto ha mostrato una sagitta massima di circa 500  $\mu\text{m}$ , considerata accettabile. Tuttavia, il confronto con la simulazione ANSYS dell'oggetto deve essere approfondito. A tale scopo, andrebbe eseguita la caratterizzazione del materiale della trave, creando dei provini appositi da inserire nelle impostazioni della simulazione.

I risultati del test vibrazionale hanno dato risultati positivi. Le frequenze di risonanza più basse si sono riscontrate sopra ai 200 Hz (la prima intorno ai 250 Hz). In questo caso, il risultato della simulazione è risultato compatibile con il test effettuato in laboratorio. Lo stesso test andrà ripetuto con il modulo completamente assemblato. Da questo punto di vista, aumentando l'inerzia del modulo, ci aspettiamo che le frequenze a cui si ha risonanza aumentino in valore.

I controlli qualità del traliccio hanno mostrato che durante l'assemblaggio manuale si creano delle tensioni dovute al posizionamento forzato dei singoli elementi che compongono la trave. Una possibile soluzione al problema potrebbe essere la modifica del sistema di produzione. Utilizzando sempre il metodo sottrattivo, si potrebbe creare un tubo triangolare dal quale rimuovere il materiale in eccesso tramite taglio ad acqua 3D, evitando così che si creino delle tensioni dovute all'incollaggio dei singoli elementi.

La caratterizzazione elettrica del prototipo di circuito flex in rame tramite il "diagramma ad occhio" e il test di attenuazione hanno dato risultati soddisfacenti. Il segnale viene mantenuto leggibile alle frequenze di lavoro dei sensori OBELIX. Abbiamo stimato che il circuito possa mantenere il segnale sufficientemente integro fino ad un bit rate di  $\sim 670$  Mbits/s, contro i  $\sim 320$  Mbits/s richiesti da specifica. I test andranno però effettuati nuovamente con il circuito flex in alluminio, come da progetto. Le piste in alluminio del circuito limiteranno il material budget del modulo, il circuito è infatti il componente che contribuisce maggiormente al suo material budget totale. Avendo l'alluminio una conducibilità elettrica più bassa, per mantenere la caduta di tensione nominale di 100 mV andrà ridisegnato il circuito.

Infine andranno caratterizzate termicamente le cold plate. Al momento sono in fase di produzione presso l'azienda Loson Compositi. Nei laboratori dell'INFN sez. Pisa si sta preparando l'apparato sperimentale necessario alla caratterizzazione, in modo da effettuare il test appena le cold plate arriveranno in sede.

Le caratterizzazioni meccaniche ed elettriche dei prototipi di modulo per VTX, hanno mostrato la fattibilità delle soluzioni tecnologiche scelte e permet-

teranno di finalizzare il progetto del rivelatore nei prossimi mesi.

# Capitolo 6

## Appendice

### 6.1 Appendice confronto material budget

In questa sezione dell'appendice ho raccolto alcuni grafici dettagliati relativi allo studio sul material budget di VXD.

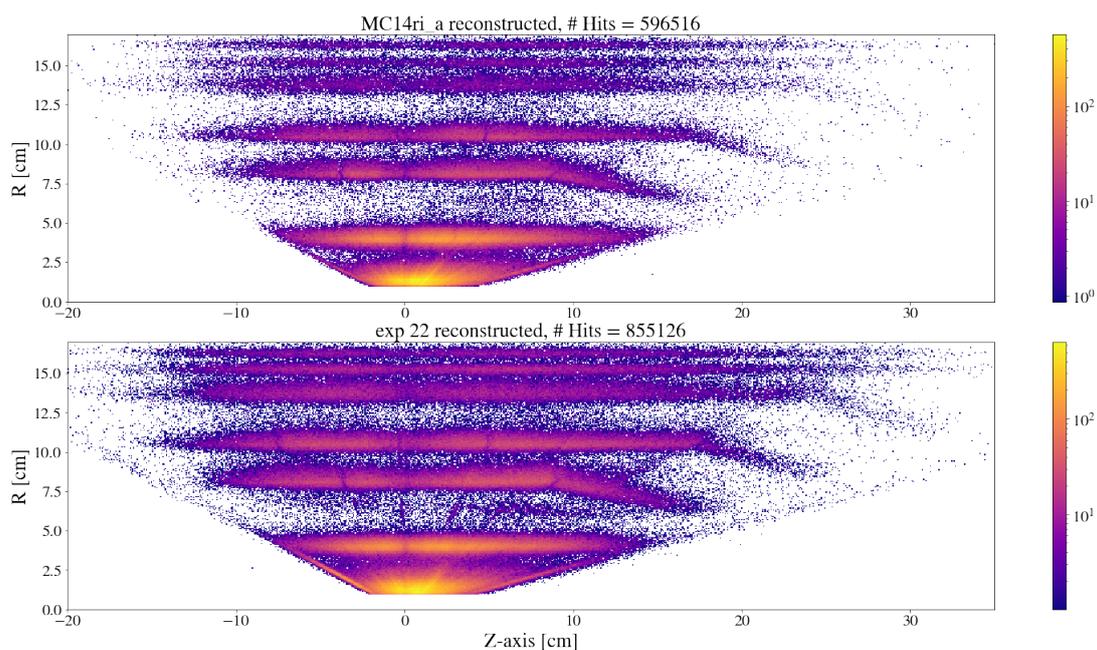


Figura 6.1: Istogramma 3D, ogni entrata rappresenta un vertice di produzione di coppia  $e^+e^-$ . Scala logaritmica in Z. In queste distribuzioni non è stato applicato nessun criterio di selezione. In alto la distribuzione delle coordinate Z,R dei vertici del MC. In basso la distribuzione delle coordinate Z,R dei vertici dei dati.  $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ .

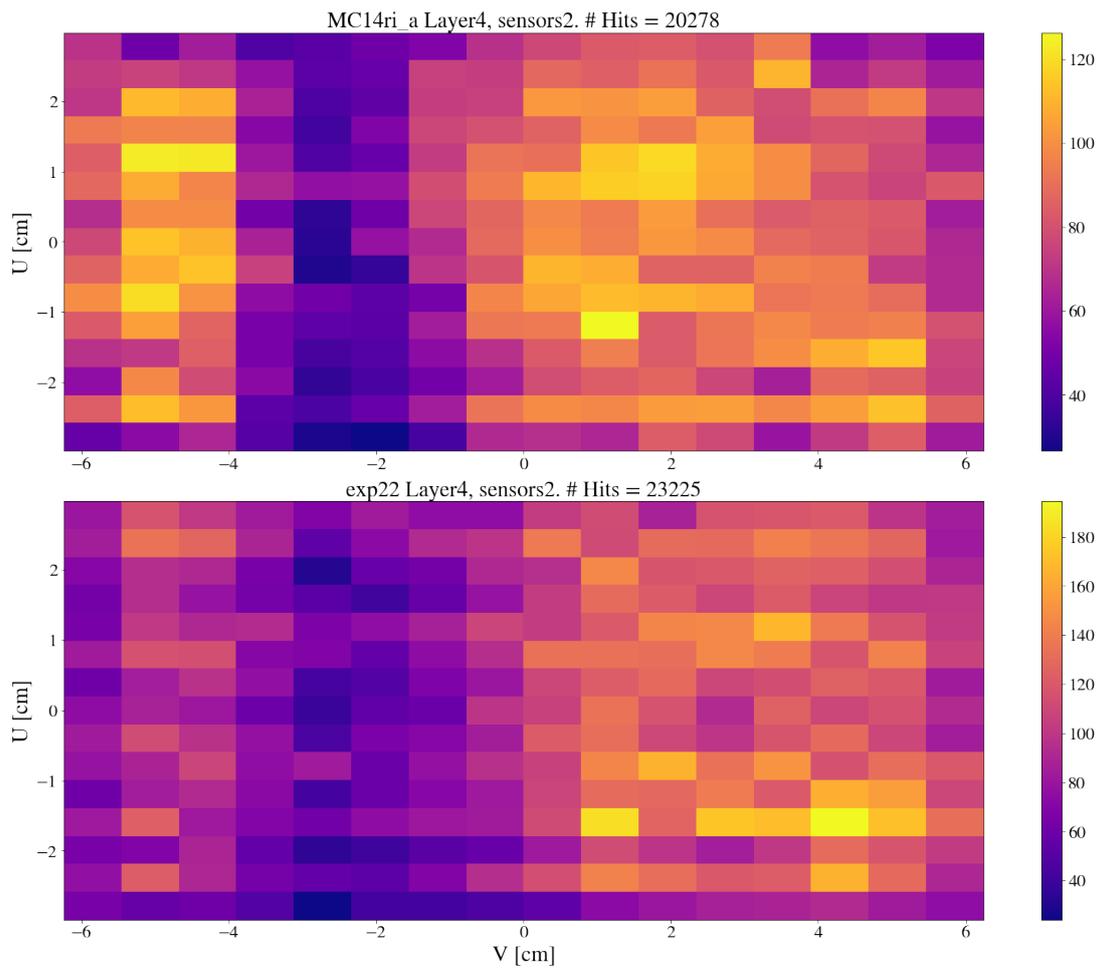


Figura 6.2: Distribuzione dei vertici di produzione di coppie sul sensore barrel del layer4 di SVD.

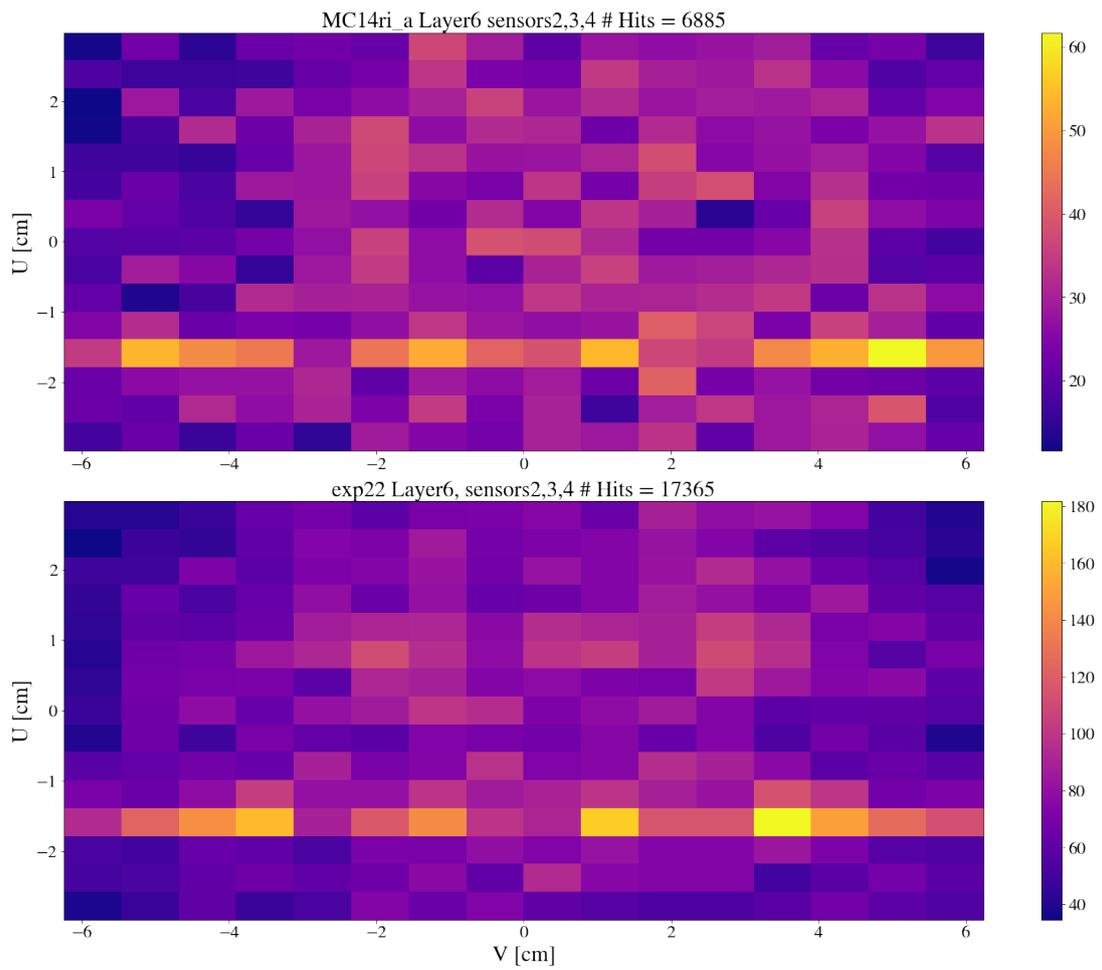


Figura 6.3: Distribuzione dei vertici di produzione di coppie sui sensori barrel del layer6 di SVD.

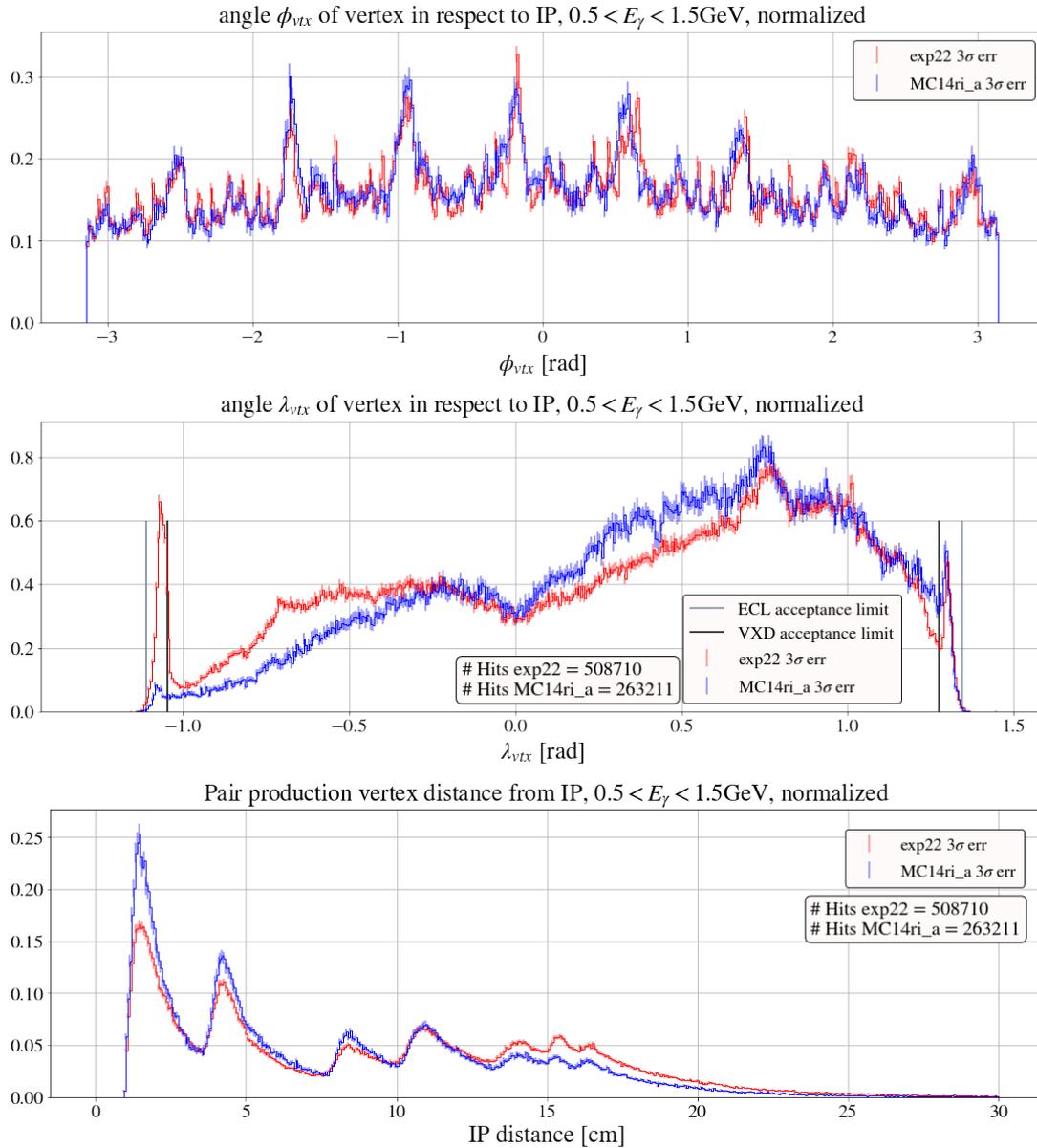


Figura 6.4: In alto la distribuzione della coordinata  $\phi_{vtx}$  per i dati e per il Monte Carlo. In mezzo la distribuzione della coordinata  $\lambda_{vtx}$  per i dati e per il Monte Carlo. In basso la distribuzione della distanza dei vertici dall'IP per i dati e per il Monte Carlo. Istogrammi normalizzati in area. Gli errori sono statistici e calcolati a partire dalla statistica dell'istogramma e dagli errori dell'efficienza e della geometria del flusso.

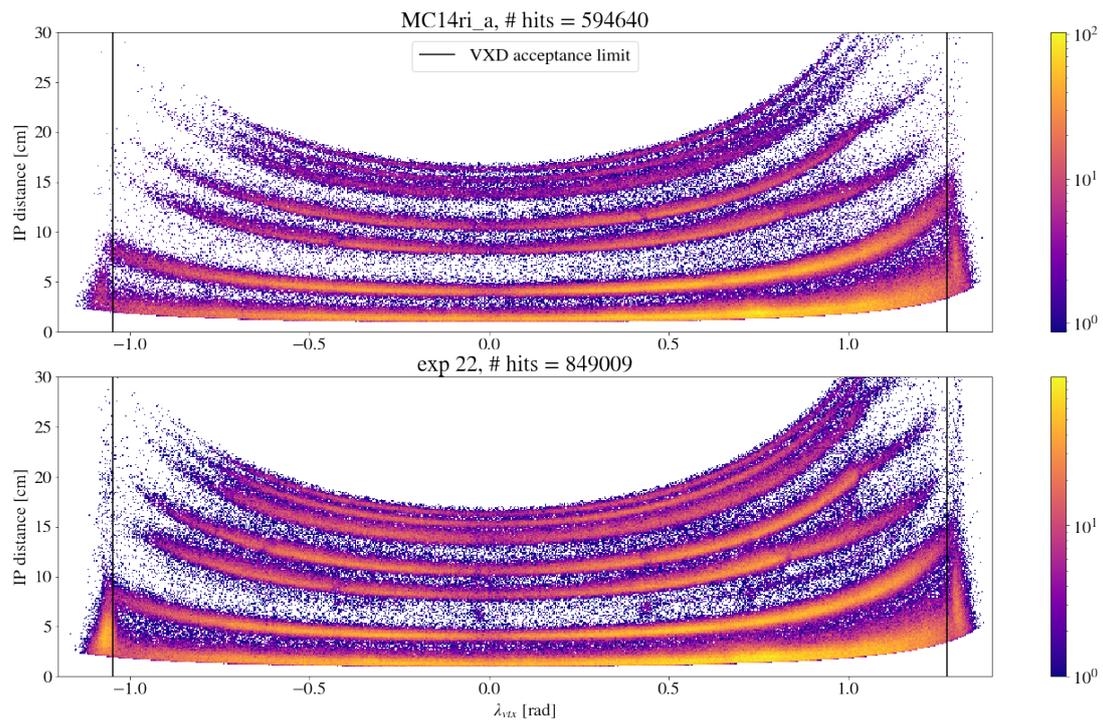


Figura 6.5: Distribuzione dei vertici di produzione di coppie in funzione della distanza dal punto di interazione e di  $\lambda_{vtx}$ . In alto il Monte Carlo. In basso i dati.

## 6.2 Appendice caratterizzazioni VTX L5

In questa sezione dell'appendice ho raccolto alcuni grafici e informazioni dettagliate relative alla caratterizzazione dei prototipi di modulo per VTX.

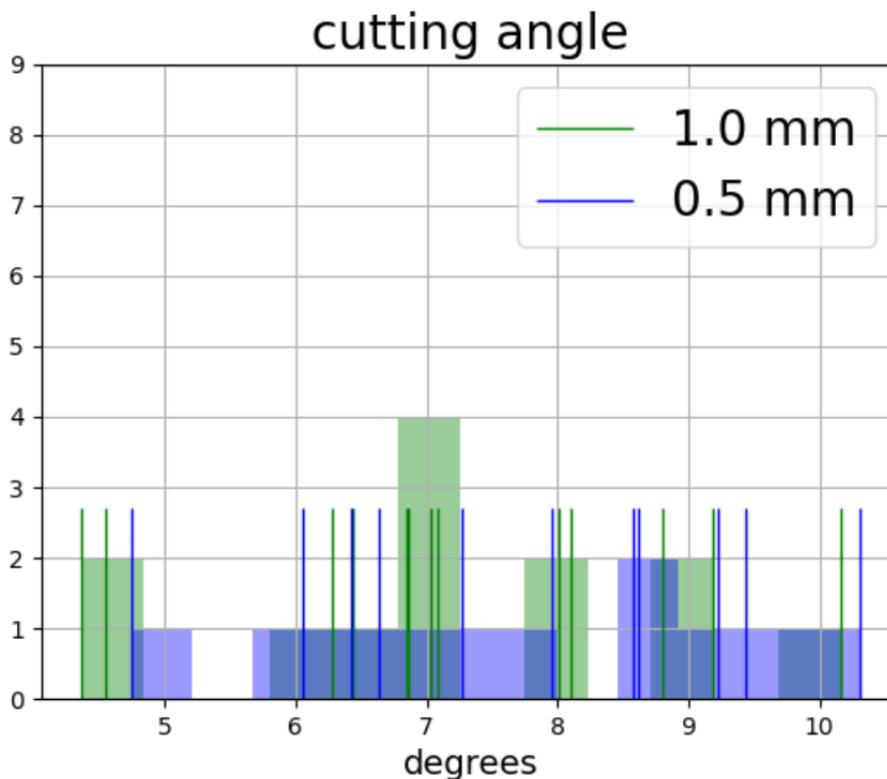


Figura 6.6: distribuzione dell'angolo di taglio di ogni singolo elemento. La distribuzione è uniforme tra 5 e 10 in quanto il verso "down", avendo uno spigolo di taglio meno netto rende meno precisa la misura della larghezza di taglio (vedi fig. 4.11), in maniera impossibile da quantificare con precisione.

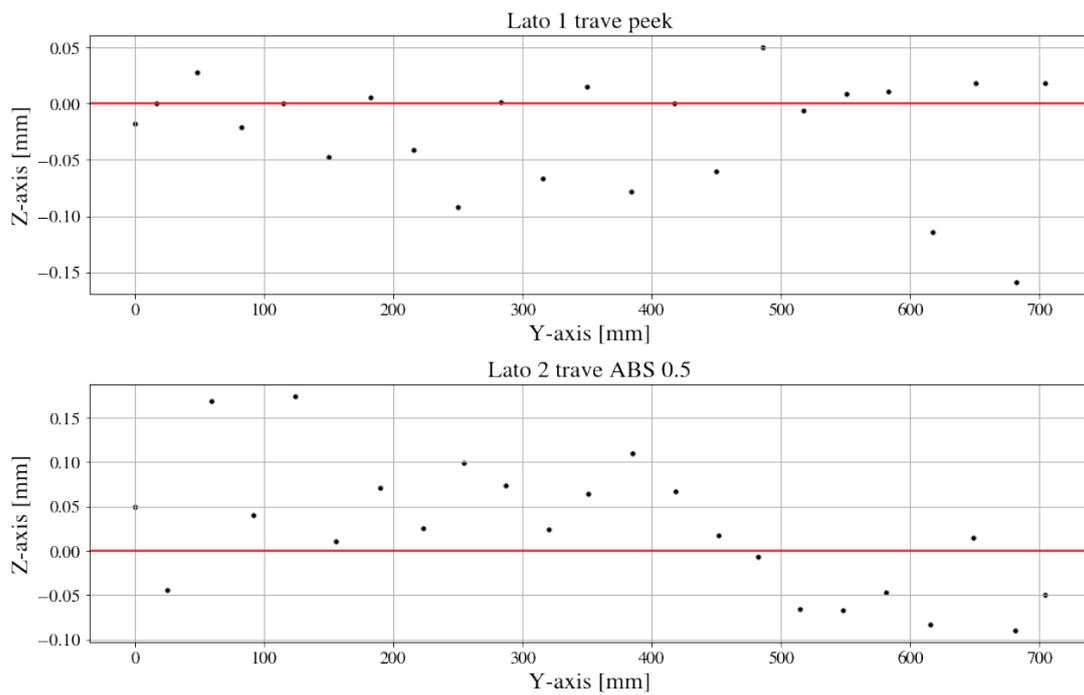


Figura 6.7: In alto la misura effettuata sul lato 1 della trave (rispetto all'immagine 4.24 il lato 1 è quello verso il fotografo) in basso sul lato 2 (il lato verso il PC).

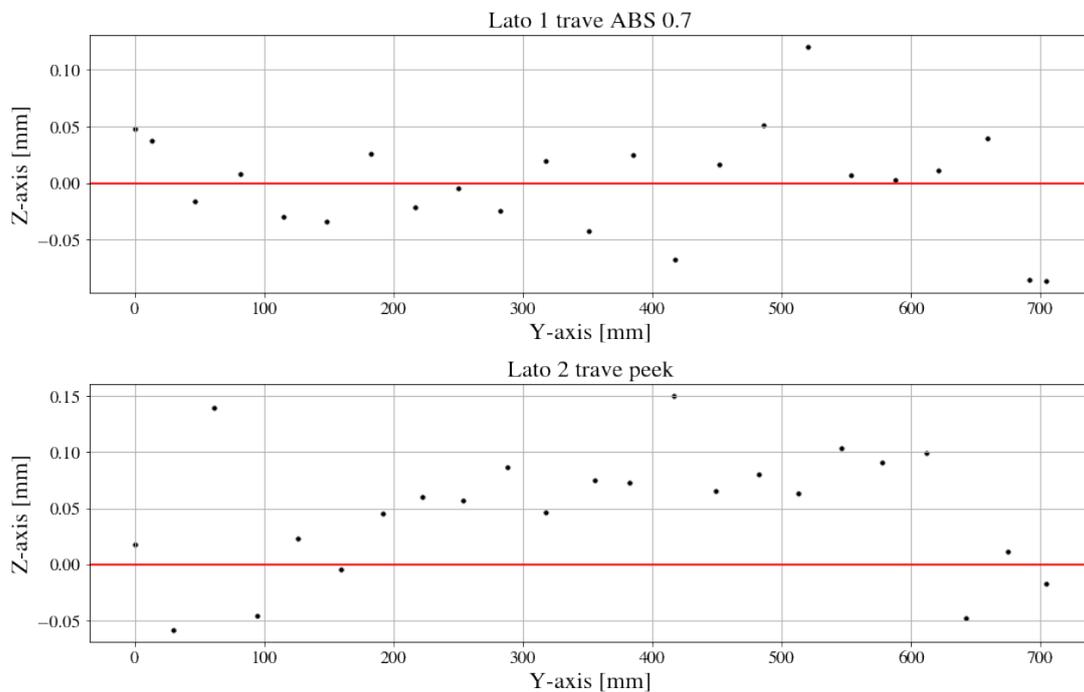


Figura 6.8: In alto la misura effettuata sul lato 1 della trave (rispetto all'immagine 4.24 il lato 1 è quello verso il fotografo) in basso sul lato 2 (il lato verso il PC).

Layer 5 Radiation length												
MECHANICS	SUPPORT STRUCTURE											
	Component	Qty	Volume (mm3) from cad	Width (mm)	Length (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)				
	CF Reticular structure M60J + "C"	1	4049.7	36	700	0.161	26.08	0.062%				
	COLD PLATE											
	Component	Qty	Volume (mm3) from cad	Total volume (mm3)	Nominal Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)		
	Carbon fleece (upper)	2	374	748	0.020	39	700	0.027	106.8	0.003%	0.066%	
	Graphite paper	2	523.073	1046.146	0.025	39	700	0.038	26.56	0.014%		
	K13D2U	2	1689.6	3379.2	0.120	39	700	0.124	26.08	0.047%		
	Carbon fleece (lower)	2	281.6	563.2	0.020	39	700	0.021	106.8	0.002%		
	PIPES & COOLANT											
Component	Qty	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Cross section (mm)	Length (mm)	Total Volume (mm3)	Width (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)		
Polyimide pipes (141-0083)	4	2.032	2.223	0.638	700	1786.326	39	0.065	28.41	0.023%	0.116%	
Demineralized water	4	-	2.032	3.241	700	9075.595	39	0.332	35.76	0.093%		
GLUE	Position	Qty	Weight (g)	Glue density (g/cm3)	Total Volume (mm3)	Length (mm)	Width (mm)	Total Width (mm) with overlap	Thickness (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)
	Araldite 2011 between the 3 plates of the beams	1	0.36	1.1	327.27	700	x	39	x	0.012	33.5	0.004%
	Araldite 2011 between cold plate and chips	2	x	x	1400.0	700	20	39	0.05	0.051	33.5	0.015%
	Araldite 2011 between Chips and flex	2	x	x	1400.0	700	20	39	0.05	0.051	33.5	0.015%
	Araldite 2011 between C pieces and CF structure	26			15.47	17	0.7	39	0.05	0.001	33.5	0.0002%
	Araldite 2011 between C pieces and Chips	52			1.27	0.7	0.7	39	0.05	0.000	33.5	0.00001%
												0.034%
FLEX FW	Component	Material	Volume (mm3) from cad	Width (mm)	Length (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)				
	PCB	Polyimide	1602.612	20	360.55	0.222	28.57	0.078%	0.148%			
	Signal and Power	Aluminum	105.626	20	360.55	0.015	8.897	0.016%				
	Pixel Chips	Silicon	360.000	20	360.55	0.050	9.369	0.053%				
FLEX BW	Component	Material	Volume (mm3) from cad	Width (mm)	Length (mm)	Equivalent thickness (mm)	Material Radiation length (cm)	Equivalent radiation length (%)				
	PCB	Polyimide	1455.930	20	330.5	0.220	28.57	0.077%	0.144%			
	Signal and Power	Aluminum	82.249	20	330.5	0.012	8.897	0.014%				
	Pixel Chips	Silicon	330.000	20	330.5	0.050	9.369	0.053%				

Figura 6.9: Tabella contenente il calcolo del material budget in percentuali di lunghezza di radiazione di VTX L5, componente per componente.

## F I B E R P R O P E R T I E S

	English	Metric	Test Method	
Tensile Strength	611 ksi	4,210 MPa	TY-030B-01	
Tensile Modulus	63.3 Msi	436 GPa	TY-030B-01	
Strain	1.0 %	1.0 %	TY-030B-01	
Density	0.066 lbs/in <sup>3</sup>	1.84 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02	
Filament Diameter	2.0E-04 in.	5 μm		
Yield	6K	6,679 ft/lbs	223 g/1000m	TY-030B-03
	12K	3,347 ft/lbs	445 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50A, 50B	1.0 %	TY-030B-05	
	Twist	Twisted, Untwisted		

## F U N C T I O N A L P R O P E R T I E S

CTE	-0.9 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.17 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.202 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	0.9 $\times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	>99 %
Na + K	<50 ppm

## C O M P O S I T E P R O P E R T I E S \* \*

Tensile Strength	315 ksi	2,160 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	35.5 Msi	245 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	0.8 %	0.8 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	145 ksi	980 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	33.0 Msi	225 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	8.5 ksi	59 MPa	ASTM D-3518
ILSS	12.0 ksi	8.5 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	6.5 ksi	45 MPa	ASTM D-3039

Figura 6.10: specifiche meccaniche M46J. In alto le specifiche della sola fibra. In basso le specifiche di un ply composto da fibra M46J impregnata al 60% di resina epossidica, curata a 170°.

# Bibliografia

- [1] E Kou et al. «The Belle II Physics Book». In: *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2019.12 (dic. 2019). ISSN: 2050-3911. DOI: 10.1093/ptep/ptz106. URL: <http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptz106>.
- [2] Akeroyd A.G., Aoki M. e Arhrib A. et al. «Prospects for charged Higgs searches at the LHC». In: *Eur. Phys. J. C* 77 276 (mag. 2017). DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4829-2>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-017-4829-2#citeas>.
- [3] P.A. Zyla et al. «Review of Particle Physics». In: *PTEP* 2020.8 (2020). and 2021 update, p. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104.
- [4] Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli e Maurizio Spurio. *Particles and Fundamental Interactions*. Springer Nature; 2° edizione, 2011. ISBN: 978-9400724631.
- [5] W.-M. Yao et al. «Passage of particles through matter». In: *Journal of Physics G* 33.1 (2006). URL: <http://pdg.lbl.gov/>.
- [6] Hermann Kolanoski e Norbert Wermes. *Particle Detectors: Fundamentals and Applications*. OUP Oxford first edition, giu. 2020. ISBN: 978-0-19-885836-2.
- [7] J. W. Motz, Haakon A. Olsen e H. W. Koch. «Pair Production by Photons». In: *Reviewa of Modern Physics* 41.4 (ott. 1969). URL: <https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.41.581>.
- [8] Ashton B. Carter e A. I. Sanda. «CP violation in  $B$ -meson decays». In: *Phys. Rev. D* 23 (7 apr. 1981), pp. 1567–1579. DOI: 10.1103/PhysRevD.23.1567. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.23.1567>.
- [9] I. I. Bigi e A. I. Sanda. « $B^0 - \bar{B}^0$  mixing and violations of CP symmetry». In: *Phys. Rev. D* 29 (7 apr. 1984), pp. 1393–1398. DOI: 10.1103/PhysRevD.29.1393. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.29.1393>.
- [10] PIERMARIA ODDONE. «An Asymmetric B-Factory Based on PEPa». In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 578.1 (1989), pp. 237–247. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1989.tb50614.x>. eprint: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1749-6632.1989.tb50614.x>. URL: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-6632.1989.tb50614.x>.

- [11] SuperB Collaboration. *SuperB: A High-Luminosity Asymmetric  $e^+e^-$  Super Flavor Factory. Conceptual Design Report*. 2007. DOI: 10.48550/ARXIV.0709.0451. URL: <https://arxiv.org/abs/0709.0451>.
- [12] Kazunori Akai, Kazuro Furukawa e Haruyo Koiso. «SuperKEKB collider». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 907 (2018). Advances in Instrumentation and Experimental Methods (Special Issue in Honour of Kai Siegbahn), pp. 188–199. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218309616>.
- [13] P.M. Lewis et al. «First measurements of beam backgrounds at SuperKEKB». In: *Nucl. Instr. Meth. A* 914 (2019), pp. 69–144. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.05.071>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218306909>.
- [14] Belle Collaboration. URL: <https://belle.kek.jp/>.
- [15] Belle II Collaboration. URL: <https://confluence.desy.de/display/BI/Belle+II+Luminosity>.
- [16] I. Adachi et al. «Detectors for extreme luminosity: Belle II». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 907 (2018). Advances in Instrumentation and Experimental Methods (Special Issue in Honour of Kai Siegbahn), pp. 46–59. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.068>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218304200>.
- [17] Belle II collaboration. «Belle II Technical Design Report». In: (nov. 2010).
- [18] F Mueller. «Some aspects of the Pixel Vertex Detector (PXD) at Belle II». In: *Journal of Instrumentation* 9.10 (ott. 2014), pp. C10007–C10007. DOI: 10.1088/1748-0221/9/10/c10007. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/c10007>.
- [19] K. Adamczyk et al. «The silicon vertex detector of the Belle II experiment». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 824 (2016). Frontier Detectors for Frontier Physics: Proceedings of the 13th Pisa Meeting on Advanced Detectors, pp. 406–410. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.09.076>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215011316>.
- [20] Manfred Valentan. «The Silicon Vertex Detector for b-tagging at Belle II». In: *TU Wien Academic Press* (). PhD Thesis. DOI: 10.34726/hss.2013.21509. URL: <https://doi.org/10.34726/hss.2013.21509,%20http://hdl.handle.net/20.500.12708/5620>.
- [21] O.Alonso et al. «Proposal of an all-layer monolithic pixel vertex detector for the Belle II upgrade». In: (). internal note, restricted access.

- [22] Ludovico Massaccesi. «Performance study of the SVD detector of Belle II and future upgrades». In: *Università di Pisa* (). tesi magistrale.
- [23] Andreas Moll. «The Software Framework of the Belle II Experiment». In: *Journal of Physics: Conference Series* 331.3 (dic. 2011), p. 032024. DOI: 10.1088/1742-6596/331/3/032024. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/331/3/032024>.
- [24] S. Agostinelli et al. «Geant4—a simulation toolkit». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (2003), pp. 250–303. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688>.
- [25] C. Gargiulo on behalf of Alice Collaboration. *ALICE ITS UPGRADE Mechanics and Cooling*. 2015. URL: [https://indico.cern.ch/event/388177/contributions/1820532/attachments/775930/1064037/20150528\\_CLIC-ALICE\\_ITS\\_Upgrade\\_CGARGIULO.pdf](https://indico.cern.ch/event/388177/contributions/1820532/attachments/775930/1064037/20150528_CLIC-ALICE_ITS_Upgrade_CGARGIULO.pdf).
- [26] Inc. Toray Composite Materials America. *Range of Carbon Fiber Properties*. URL: <https://www.toraycma.com/products/carbon-fiber/>.
- [27] Ed. A.J. Bevan et al. «The Physics of the B Factories». In: *Annalen der Physik* 322 (1905), pp. 891–921. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053221004>.
- [28] J. P. Lees et al. «Measurement of the  $D^*(2010)^+$  natural line width and the  $D^*(2010)^+ - D^0$  mass difference». In: *Physical Review D* 88.5 (set. 2013). DOI: 10.1103/physrevd.88.052003. URL: <https://doi.org/10.1103/physrevd.88.052003>.

# Ringraziamenti

I miei relatori sono sicuramente le persone che più di tutti hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro di tesi. Il mio primo ringraziamento va quindi al Prof. **Stefano Bettarini** e alla "quasi" Prof.ssa (non voglio gufare) **Giulia Casarosa**. Con la loro professionalità e la loro disponibilità mi hanno permesso di rendere questa tesi un lavoro di cui vado estremamente orgoglioso.

Il secondo ringraziamento non posso che dedicarlo al Professor **Forti**. Con le sue capacità organizzative, le sue conoscenze sconfiniate e la sua umanità, è riuscito a creare un ambiente di lavoro amichevole e professionale allo stesso tempo, in cui ho avuto il piacere e l'onore di lavorare per questo ultimo anno di università.

A questo punto il pensiero va alle persone che tecnicamente hanno reso questa tesi possibile. In particolare mi riferisco all'Ing. **Maurizio Massa** che mi ha accompagnato in tutta la parte dedicata alla meccanica e a **Marco Ceccanti** che con le sue competenze in laboratorio e soprattutto con la sua pazienza ha saputo assecondare tutte le nostre innumerevoli richieste. Non posso non nominare l'Ing. **Massimo Minuti** che con la sua distensiva gentilezza ha reso possibile tutta la parte dedicata al circuito elettrico. Questo paragrafo lo concludo ringraziando **Antonio Paladino** che mi ha saputo iniziare alle camere pulite dell'INFN di Pisa, con tutta la fiducia che bisogna avere per lasciare smanettare un piccolo fisico su macchinari da milioni di euro.

Un ringraziamento va a tutte le persone che lavorano alla collaborazione Belle II a Pisa ma non solo: tutte in un modo o nell'altro hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi. Dalla Professoressa **Giuliana Rizzo** all'Ing. **Filippo Bosi** e al Prof. **Eugenio Paoloni**, passando per **Tenchini** e **Suryanarayan, Luigi** e **Ludovico**. Infine fuori da Pisa a **Sascha Dreyer** che mi ha entusiasticamente passato i risultati del suo lavoro sull'efficienza di ricostruzione.

Gli ultimi ringraziamenti "accademici" vanno alle mie compagne di tesi, con cui ho condiviso l'esperienza di Roma e tutto questo ultimo anno di lavoro. Un pensiero particolare va a **Laura** con cui ho condiviso l'inizio della tesi e l'ultimo esame, e **Silvia** con cui condivido la fine di questo percorso. Senza dimenticare **Maria Antonietta** e le "nuove arrivate" a Belle II **Eleonora** e **Mara**.

Il primo ringraziamento fuori dall'università va sicuramente ai miei **genitori**, a cui dedico questo lavoro. Loro sanno quando sia stato difficile per me portare a termine questo percorso e hanno saputo avere la fiducia e la pazienza fondamentali per permettermi di completare questa laurea magistrale con i miei tempi e nonostante i miei momenti scorbutici.

Visto che questo lavoro di tesi è il coronamento dei miei anni passati a Pisa, un pensiero va anche all'**E-Team Squadra Corse** e a tutti i suoi componenti. La squadra di motorsport universitario che mi ha dato la possibilità di vivere un'esperienza di direzione e organizzazione che porterò con me per il resto della vita, oltre ad avermi regalato i momenti migliori di questi anni pisani.

Un ringraziamento va anche alle mie **sorelle**, il lato creativo della nostra famiglia, che hanno sempre saputo appoggiarmi e caricarmi in tutte le fasi di questa laurea magistrale, con tutta la loro stima e il loro colore.

Ringrazio tutti i miei **parenti** che compongono la mia bellissima famiglia gigante e chiassosa. I miei cugini, i miei zii e i miei nonni che in ogni momento sono sempre pronti a fare tutto il possibile per aiutarmi.

Un pensiero va anche a tutti gli **amici** a casa con cui sono cresciuto, la mia certezza nel paesino in mezzo alla pianura in cui sono nato e a cui sono così legato.

Infine, l'ultimo ringraziamento lo dedico a **Sophie**. Alla mia compagna, con cui condivido ogni momento di questa vita grande o piccolo che sia. Che in un qualche modo che non riesco a capire è in grado di essere paziente e determinata con il giusto equilibrio, tirando fuori sempre la parte migliore di me. Senza di lei non avrei mai portato a termine questo percorso, lei è sia il vento che mi spinge che lo scoglio a cui mi posso aggrappare e io sono fortunato a poter condividere la vita con una persona come lei.