

Indice

Premessa.....	7
Capitolo 1.....	11
La fisica di NA62.....	11
1.1 Motivazioni alla base dell'esperimento NA62	11
1.2 Cenni su Modello Standard, matrice CKM e simmetria CP	11
1.3 Operatore di coniugazione di carica (C)	12
1.4 Operatore di inversione delle coordinate spaziali o di parità (P)	13
1.5 Simmetria CP.....	14
1.6 Scoperta sperimentale della violazione di CP.....	14
1.7 Implicazioni cosmologiche della violazione della simmetria CP	15
1.8 Operatore di inversione temporale (T)	16
1.9 Simmetria CPT.....	17
1.10 Matrice CKM.....	17

1.11	Composizione della matrice CKM secondo la parametrizzazione di Wolfenstein.....	20
1.12	Triangolo di unitarietà.....	21
1.13	Tecniche di misura del parametro $ V_{td} $	24
Capitolo 2.....		29
Setup sperimentale e rivelatori.....		29
2.1	Principali problematiche legate ad NA62.....	29
2.2	Modi di decadimento del mesone K^+	29
2.3	Decadimenti a due corpi, reiezione cinematica del fondo	31
2.4	Decadimenti a tre e quattro corpi, PID (Particle IDentification) e rivelatori di fotoni	34
2.5	Legame fra fascio primario di protoni e fascio secondario di mesoni K.....	38
2.6	Motivazioni alla base della scelta di un fascio secondario costituito da mesoni K positivi	40
2.7	Collimazione e selezione del fascio.....	40
2.8	CEDAR (ChErenkov Differential counter with Achromatic Ring focus)	43
2.9	Misura della direzione e del momento delle particelle del fascio	47
2.10	Camera a vuoto ed apparato sperimentale.....	47
2.11	Sistema di veto per fotoni.....	50

2.11.1 SAV (Small Angle Vetoes).....	52
2.11.1.1 Calorimetro a campionamento Shashlyk.....	55
2.11.1.2 Calorimetro omogeneo PbWO ₄	57
2.11.2 LKR (Liquid KRipton calorimeter).....	59
2.11.3 LAV (Large Angle Vetoes).....	60
2.11.3.1 Moduli con vetri al piombo.....	62
2.12 STRAW TRACKER.....	65
2.13 RICH (Ring Imaging CHerenkov counter)	68
2.14 MUV (MUon Veto system)	70
Capitolo 3.....	75
Il GigaTracker e il problema dello smaltimento del calore.....	75
3.1 Motivazioni che rendono necessario l'utilizzo del GigaTracker.....	75
3.2 Misure effettuate dalle stazioni GigaTracker.....	76
3.3 Ruolo svolto dalle stazioni GigaTracker nel contesto della reiezione cinematica del fondo.....	77
3.4 Flusso di particelle atteso sul rivelatore e risoluzioni relative alle misure effettuate.....	78
3.5 Specifiche tecniche delle stazioni GigaTracker.....	79
3.6 Budget di materiale posto attraverso il fascio di particelle.....	83

3.7	Esposizione del rivelatore in silicio al fascio di particelle e relativa corrente generata.....	84
3.8	Requisiti termici e potenza dissipata.....	86
3.9	Resistenza del materiale alla radiazione.....	87
3.10	Ambiente operativo ed esigenza di un sistema di raffreddamento...	89
Capitolo 4.....		91
Simulazioni con il software I-DEAS 12.....		91
4.1	Generalità sul CAD I-DEAS 12.....	91
4.2	Struttura del software.....	91
4.3	Analisi utilizzate.....	93
4.4	Modellazione di una stazione di rilevamento GigaTracker tramite il software I-DEAS 12.....	94
4.5	Partizione dei volumi	98
4.6	Applicazione delle condizioni al contorno.....	102
4.7	Simulazione di raffreddamento.....	104
4.8	Conduttura di flussaggio gas.....	105
4.9	Risoluzione del modello termico e scelta dei materiali	107
4.9.1	Risultati ottenuti con Arctic Silver 5.....	107
4.9.2	Risultati ottenuti con Akasa AK TC 5022.....	113
4.10	Conduttura di flussaggio gas periferica.....	118
4.11	Simulazione del GigaTracker.....	121

4.12	Analisi termica della configurazione.....	128
4.13	Costruzione del prototipo del GigaTracker e del sistema di raffreddamento.....	133
	Conclusioni.....	139
	Appendice.....	141
	Tecnologie alternative ai vetri al piombo per la realizzazione dei contatori LAV.....	141
A.1	Calorimetro à la CKM.....	141
A.2	Calorimetro à la KLOE.....	143
	Bibliografia.....	147
	Ringraziamenti.....	149

Premessa

Finora il Modello Standard delle interazioni fra particelle elementari si è rivelato in grado di spiegare tutti i risultati sperimentali ottenuti nei vari esperimenti presso gli acceleratori di particelle. Anche il rapporto di decadimento relativo a processi fortemente soppressi, in particolare il decadimento raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, viene previsto dal modello standard con ottima precisione. Proprio per questo è utile ottenere sperimentalmente una misura di pari precisione del suddetto rapporto di decadimento: una eventuale discrepanza fra il valore teorico e quello sperimentale potrebbe infatti indicare l'esistenza di nuova fisica.

L'esperimento NA62 al CERN è stato ideato per ottenere la misura del $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$. Consentirà quindi di ricavare una stima del valore del parametro $|V_{td}|$ della matrice CKM. Il decadimento in esame si presta particolarmente alla ricerca di nuova fisica, in quanto potrebbe evidenziare la presenza di particelle attualmente ignote e di massa più elevata di quella del quark top. Tali particelle potrebbero essere messe in luce quali mediatori virtuali nei processi a breve distanza che caratterizzano, fra l'altro, anche i decadimenti rari del mesone K.

Il presente lavoro si focalizza sullo studio del comportamento termico e meccanico del rivelatore a pixel di silicio, utilizzato nell'esperimento. Tale rivelatore, altresì noto come GigaTracker, è di importanza cruciale in quanto fa parte di un sistema di tracciatura per la misurazione della quantità di moto e della direzione delle particelle incidenti. La trattazione seguente, articolata in quattro capitoli, tratta gli aspetti scientifici, teorici e tecnologici dell'esperimento.

Il capitolo 1 (La fisica di NA62) tratta le motivazioni alla base dell'esperimento; inizialmente si discute dei concetti basilari relativamente agli operatori discreti C, P, T, le simmetrie CP e CPT, nonché la violazione della simmetria CP e le sue implicazioni cosmologiche. Viene poi presentata la matrice CKM e pure evidenziato il legame esistente fra la sua struttura e la violazione di CP. Sappiamo infatti che la simmetria CP è quasi sempre conservata nelle interazioni deboli anche se esistono alcune eccezioni, come evidenziato sperimentalmente dall'esperimento di Cronin e Fitch. La violazione di CP è dovuta all'esistenza di una fase complessa ineliminabile all'interno della matrice CKM. Secondo il modello standard la matrice CKM è unitaria: per verificare tale ipotesi se ne misurano sperimentalmente gli elementi. In quest'ambito si inserisce l'esperimento NA62 dato che l'attuale conoscenza del parametro $|V_{td}|$ è stata ottenuta per via indiretta, derivante infatti da esperimenti sulla fisica del mesone B. Si è dapprima risaliti sperimentalmente al valore di V_{cb} e quindi, ritenendo valida l'ipotesi di unitarietà della matrice CKM, si è pervenuti a $|V_{td}|$. L'esperimento NA62 ambisce ad ottenere il valore di $|V_{td}|$ con un errore massimo del 10%, in modo completamente indipendente dalla fisica del mesone B: in tal modo si potrà confermare l'ipotesi di unitarietà oppure smentirla, nel qual caso si potrebbe avere una prova dell'esistenza di fisica non prevista dal modello standard. Il capitolo si chiude con la discussione del triangolo di unitarietà e il conseguente metodo di estrapolazione del parametro $|V_{td}|$ a partire dal valore misurato del $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$.

Il capitolo 2 (Setup sperimentale e rivelatori) si occupa delle problematiche tecniche relative all'implementazione pratica dell'esperimento. Infatti il canale di interesse ha una probabilità estremamente bassa, di gran lunga inferiore a quella di numerosi decadimenti a due, tre e quattro corpi del mesone K. Vengono dunque elencati i decadimenti in questione e poi

trattate le modalità di rivelazione cinematica conseguentemente adottate nel caso dei decadimenti a due corpi, oltre ai dispositivi di veto e di identificazione delle particelle utilizzati invece nel caso dei decadimenti a tre e quattro corpi. Viene poi trattato l'allestimento dell'esperimento presso l'SPS del CERN e l'ottica della linea di fascio K12, destinata a fornire le particelle incidenti. Per i rivelatori utilizzati viene descritta la struttura meccanica, con l'eventuale presentazione delle diverse soluzioni tecnologiche attualmente disponibili e l'indicazione della scelta adottata nel presente esperimento.

Il capitolo 3 (Il GigaTracker e il problema dello smaltimento del calore) tratta in modo dettagliato l'architettura delle stazioni di rilevamento GigaTracker e il budget di materiale utilizzato per la sua costruzione. Vengono discusse le motivazioni che hanno portato al progetto del GigaTracker. Viene anche posto l'accento sul ruolo svolto dalle stazioni GigaTracker nel contesto della rivelazione cinematica del fondo. Il rivelatore in silicio di ciascuna stazione GigaTracker è soggetto ad un rate assai elevato. A causa di ciò si produce calore, con il rischio che aumenti la temperatura del sensore. Anche se si evitasse la deriva termica, le sue proprietà elettriche verrebbero degradate dal danno da radiazione, che agisce più velocemente se la temperatura è alta. Tenendo conto che il GigaTracker dovrà operare in un ambiente operativo limite, sotto condizioni di alto vuoto, si rende necessaria l'adozione di un opportuno sistema di raffreddamento, tale da garantirne una vita almeno dell'ordine di grandezza di una presa dati, cioè 100 giorni.

Il capitolo 4 (Simulazioni con il software I-DEAS 12) presenta lo studio di un adeguato sistema di raffreddamento per il GigaTracker; per la sua progettazione ci si è avvalsi di un pacchetto CAD denominato I-DEAS 12. Innanzitutto viene presentato a grandi linee il software, evidenziandone la

struttura e le analisi effettuabili per suo tramite. Si discutono le diverse fasi progettuali da svolgere per modellare una stazione di rilevamento GigaTracker, partizionarne opportunamente i volumi con gli appositi algoritmi di meshatura ed assegnare infine i relativi materiali. Dopo la spiegazione delle condizioni al contorno necessarie per l'impostazione del modello termico, si passa alla trattazione dettagliata delle tre diverse configurazioni di raffreddamento del GigaTracker prese qui in esame. Tutte le soluzioni considerate prevedono l'adozione di una conduttura entro cui fluisca gas azoto refrigerante. Nella prima soluzione, la conduttura è aderente al lato del GigaTracker, contornante i chip di lettura. Vengono confrontate le distribuzioni di temperatura ottenute nei casi di utilizzo di due paste termiche differenti, utili per favorire il raffreddamento dei chip di read out. La seconda soluzione presentata prevede che la conduttura in cui fluisca l'azoto sia aderente ai lati del GigaTracker. Si illustrano i risultati ottenuti in tal caso, evidenziando le discrepanze rispetto ai casi precedenti. Nella terza soluzione, che è stata adottata, si prevede invece che il GigaTracker stesso venga inserito all'interno della conduttura in cui fluisca il gas. Vengono quindi presentati i risultati ottenuti per quanto riguarda la distribuzione di temperatura ricavata con il software I-DEAS 12. Si conclude con la presentazione del prototipo del GigaTracker e del sistema di raffreddamento, costruiti nell'officina meccanica della sezione di Ferrara dell'INFN e dei test finora eseguiti.

Capitolo 1

La fisica di NA62

1.1 Motivazioni alla base dell'esperimento NA62

L'esperimento NA62 [1] si svolge al CERN SPS (Super Proton Synchrotron): tale esperimento si propone di studiare il decadimento raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ al fine di misurarne il rapporto di decadimento o branching ratio (BR) ad esso associato. Si mira a rilevare circa 80 di tali decadimenti allo scopo di compiere una verifica del modello standard mediante la misura del parametro $|V_{td}|$ della matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa).

Il rapporto di decadimento BR è infatti legato al valore dell'elemento $|V_{td}|$ della matrice CKM; più precisamente si intende stimare il valore dell'elemento $|V_{td}|$ con un errore massimo del 10%.

Il valore previsto dal modello standard per il rapporto di decadimento suddetto vale: $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.0 \pm 1.1) \cdot 10^{-11}$.

1.2 Cenni su modello standard, matrice CKM e simmetria CP

Il modello standard è una teoria che riunisce il modello a quark, la teoria dell'interazione elettrodebole e la teoria dell'interazione forte. Questo

modello teorico descrive le particelle elementari e le loro interazioni; esso considera come particelle fondamentali i quark, i leptoni e le particelle di campo: quark e leptoni sono dei fermioni con spin $\frac{1}{2}$ mentre le particelle di campo sono dei bosoni con spin intero e maggiore o uguale a 1.

Più in dettaglio si hanno sei sapori di quark (u, d, c, s, t, b) e sei leptoni (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ , τ^- , ν_τ): ognuna di queste particelle risulta soggetta a una delle interazioni fondamentali se possiede una carica soggetta a quell'interazione. L'interazione elettrodebole agisce sulle particelle dotate di sapore e carica elettrica mentre l'interazione forte agisce sulle particelle dotate di carica di colore.

Le particelle di campo che fungono da mediatori di forza sono il fotone γ , i bosoni vettoriali intermedi W^+ , W^- , Z^0 e gli otto gluoni. Nell'ambito del modello standard ci si avvale della matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) per raggiungere una maggiore comprensione delle violazioni della simmetria CP. Nel seguito si introducono brevemente i concetti generali legati alle trasformazioni discrete di coniugazione di carica (C), inversione delle coordinate spaziali o parità (P), inversione temporale (T). Infine vengono discusse la simmetria CP, la violazione di CP con relative conseguenze, la simmetria CPT e si conclude con la descrizione della matrice CKM ed il suo significato fisico.

1.3 Operatore di coniugazione di carica (C)

L'operatore di coniugazione di carica (C) trasforma una particella nella corrispondente antiparticella: tale operatore inverte quindi il segno della carica elettrica, del momento magnetico e del numero fermionico.

Applicando l'operatore di coniugazione di carica ad un elettrone si ottiene un positrone $C|e^-\rangle = |e^+\rangle$, il quale è osservabile in natura.

In natura esistono soltanto neutrini left handed ν_L ed antineutrini right handed $\bar{\nu}_R$; applicando ad essi l'operatore di coniugazione di carica (C) si ottiene, rispettivamente, $C|\nu_L\rangle = |\bar{\nu}_L\rangle$ nel primo caso e $C|\bar{\nu}_R\rangle = |\nu_R\rangle$ nel secondo caso.

Poiché in entrambi i casi si tratta di stati non osservabili in natura se ne deduce che la coniugazione di carica non viene conservata nel caso dell'interazione debole.

La coniugazione di carica è conservata nelle interazioni forti ed elettromagnetiche ma è violata nelle interazioni deboli.

1.4 Operatore di inversione delle coordinate spaziali o di parità (P)

L'operatore di inversione delle coordinate spaziali o di parità (P) cambia segno alle componenti spaziali di un quadrivettore mentre ne lascia invariata la componente temporale.

Applicando ai neutrini left handed ν_L l'operatore di inversione delle coordinate spaziali o parità (P) si ottiene $P|\nu_L\rangle = |\nu_R\rangle$. Applicando poi agli antineutrini right handed $\bar{\nu}_R$ lo stesso operatore si ottiene $P|\bar{\nu}_R\rangle = |\bar{\nu}_L\rangle$.

Poiché in entrambi i casi si tratta di stati non osservabili in natura se ne deduce che la parità non viene conservata nel caso dell'interazione debole.

La parità è conservata nelle interazioni forti ed elettromagnetiche ma è violata nelle interazioni deboli.

1.5 Simmetria CP

La simmetria CP è una simmetria quasi esatta delle leggi di natura: questa simmetria consiste nell'unione delle simmetrie discrete di coniugazione di carica (C) e di parità (P). Un sistema fisico rispetta la simmetria CP qualora, dopo aver applicato entrambi gli operatori suddetti, si ottenga conseguentemente un sistema fisico osservabile in natura.

Applicando congiuntamente ai neutrini left handed ν_L ed agli antineutrini right handed $\bar{\nu}_R$ gli operatori di coniugazione di carica (C) ed inversione delle coordinate spaziali o parità (P) si ottiene, rispettivamente, $CP|\nu_L\rangle = C|\bar{\nu}_R\rangle = |\bar{\nu}_R\rangle$ nel primo caso e $CP|\bar{\nu}_R\rangle = C|\bar{\nu}_L\rangle = |\nu_L\rangle$ nel secondo caso. Poiché in entrambi i casi si tratta di stati osservabili in natura se ne deduce che i neutrini rispettano la simmetria CP. La simmetria CP è quasi sempre conservata dall'interazione debole anche se esistono alcune eccezioni. La simmetria CP viene invece conservata nelle interazioni forti ed elettromagnetiche.

1.6 Scoperta sperimentale della violazione di CP

La scoperta sperimentale della violazione di CP avvenne nel 1964 mediante l'esperimento di Cronin e Fitch [2], in cui si studiava il decadimento dei mesoni K^0 .

Di tali particelle ne esistono due tipi ovvero i mesoni K^0_S corti o short a vita breve che solitamente decadono in due pioni ed i mesoni K^0_L lunghi o long a vita lunga che solitamente decadono in tre pioni.

Generalmente si osserva il decadimento seguente: $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$. Se la simmetria CP fosse una simmetria esatta, allora K_L^0 non potrebbe decadere in due pioni; si osservò invece che in una percentuale ridotta di casi (circa lo 0.2%) aveva luogo il seguente decadimento: $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$. In questo decadimento la simmetria CP non viene conservata, quindi questa scoperta fu la dimostrazione sperimentale della violazione di CP da parte dell'interazione debole.

1.7 Implicazioni cosmologiche della violazione della simmetria CP

Attualmente si ritiene che la violazione della simmetria CP abbia avuto un ruolo determinante nelle primissime fasi di vita del nostro universo, determinando una lieve asimmetria fra materia ed antimateria: infatti la violazione di CP è una delle tre condizioni necessarie poste da Sakharov nel 1967 per spiegare la attuale predominanza di materia nell'universo che conosciamo.

Le altre due condizioni sono la possibilità del decadimento del protone durante una fase ed il non equilibrio termodinamico nell'espansione dell'universo.

In base a numerosi dati raccolti in esperimenti effettuati con gli acceleratori di particelle, è plausibile ritenere che all'atto del Big Bang si siano prodotte le medesime quantità di materia ed antimateria.

Si ritiene che successivamente al Big Bang, indicativamente a partire dall'istante $t = 10^{-35}s$, avvenne una transizione di fase tale per cui le particelle cominciarono a decadere con una piccola violazione di CP.

A causa di ciò si ottenevano, come prodotti di tali decadimenti, delle particelle in numero lievemente superiore alle antiparticelle. Durante la successiva fase di annichilazione fra particelle ed antiparticelle (in cui si dava luogo alla creazione di fotoni) si ebbe dunque una percentuale residua di particelle.

L'universo osservabile oggi è costituito da galassie, stelle, pianeti etc... formati appunto da quella materia in eccesso che non si potè annichilare con della corrispondente antimateria. Poichè il numero di fotoni è elevatissimo in confronto al numero di particelle esistenti, se ne deduce che la differenza fra le quantità di materia ed antimateria doveva essere piccolissima e quindi la violazione di CP che ne è alla base deve manifestarsi in un numero assai limitato di casi.

Se la simmetria CP fosse esatta allora si ritiene che in occasione del Big Bang si sarebbero avute esattamente le stesse quantità di particelle ed antiparticelle; esse si sarebbero annichilate tutte quante fra di loro liberando energia ed impedendo quindi la formazione di un universo formato da oggetti costituiti da particelle di materia.

1.8 Operatore di inversione temporale (T)

L'operatore di inversione temporale (T) comporta l'inversione della direzione del tempo: $t \rightarrow -t$. Dunque, se è valida la simmetria di inversione temporale, ne consegue la reversibilità di un'interazione e quindi sia questa che la sua inversa hanno la stessa probabilità di avvenire. La validità della simmetria T implica che invertendo la direzione del tempo le leggi fisiche rimangono le stesse.

1.9 Simmetria CPT

La simmetria CPT è una simmetria esatta delle leggi di natura: questa simmetria consiste nell'applicazione successiva degli operatori di coniugazione di carica (C), inversione delle coordinate spaziali (P) ed inversione temporale (T).

Il teorema CPT nella versione fornita da Schwinger e Pauli afferma che la funzione d'onda scalare $\psi(t,r)$ deve essere invariante rispetto all'azione combinata degli operatori di coniugazione di carica (C), inversione spaziale o parità (P) e inversione temporale (T) ovvero deve essere invariante rispetto all'operatore combinato CPT.

La simmetria CPT è attualmente considerata una simmetria esatta delle leggi di natura in quanto finora non ne è mai stata evidenziata sperimentalmente alcuna violazione. La simmetria CPT viene conservata dalle interazioni forti, elettromagnetiche e deboli.

1.10 Matrice CKM

Il modello standard descrive l'interazione forte, elettromagnetica e debole considerando come particelle elementari i quark, i leptoni e le particelle di campo.

La matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) è una matrice complessa unitaria 3×3 utilizzata nell'ambito del modello standard per mettere in relazione gli autostati dell'interazione forte dei quark con gli autostati dell'interazione debole dei quark. Infatti i quark sono dotati sia di carica di

colore che di sapore e quindi vanno soggetti sia all'interazione forte che all'interazione debole.

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

Le interazioni deboli non conservano il sapore dei quark. E' possibile suddividere i quark in tre famiglie ovvero: (u, d), (c, s), (t, b). Nel caso delle interazioni deboli dei quark, sono possibili delle transizioni o cambiamenti di sapore fra tutte e tre le relative famiglie: questi processi di trasformazione dei quark sono detti mescolamenti.

I quark u, c, t sono detti quark up-like e sono dotati di carica elettrica $+2e/3$ mentre i quark d, s, b sono detti quark down-like e sono dotati di carica elettrica $-e/3$.

La matrice CKM è in grado di spiegare le interazioni deboli fra quark che comportano dei cambiamenti di sapore: queste transizioni possono avvenire solamente fra stati up-like e stati down-like.

La matrice CKM è non-diagonale: la conseguenza di questo fatto è la possibilità di miscelamenti fra sapori di quark (flavour mixing) nel caso di interazioni di correnti cariche.

Una simmetria esatta di CP imporrebbe che tutti gli elementi della matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) fossero reali ma, essendo nel modello standard contemplate tre famiglie di quark, non è possibile riuscire a ridefinire le variabili in modo tale da rendere reali tutti questi elementi: rimane infatti una fase complessa. La violazione di CP è appunto

dovuta all'esistenza di una fase complessa ineliminabile all'interno della matrice CKM.

La seguente tabella riporta i valori attualmente noti dei moduli degli elementi della matrice CKM:

Modulo	Valore
$ V_{ud} $	0.97418 ± 0.00027
$ V_{us} $	0.2255 ± 0.0019
$ V_{ub} $	$(3.93 \pm 0.36) \times 10^{-3}$
$ V_{cd} $	0.230 ± 0.011
$ V_{cs} $	1.04 ± 0.06
$ V_{cb} $	$(41.2 \pm 1.1) \times 10^{-3}$
$ V_{td} $	$(8.1 \pm 0.6) \times 10^{-3}$
$ V_{ts} $	$(38.7 \pm 2.3) \times 10^{-3}$
$ V_{tb} $	$0.77^{+0.18}_{-0.24}$

Tabella 1.1: valori noti dei moduli degli elementi della matrice CKM, aggiornati al luglio 2008.

Secondo il modello standard la matrice CKM deve essere una matrice unitaria; ne deriva la necessità di misurare sperimentalmente i valori degli elementi della matrice in modo da poter verificare che effettivamente la matrice CKM sia davvero unitaria.

Lo scopo dell'esperimento NA62 è quello di ottenere una misura accurata del valore del branching ratio relativamente al decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ in modo da consentire di stimare il valore dell'elemento $|V_{td}|$ con un errore massimo del 10%. Per lo studio della violazione di CP risultano particolarmente interessanti i decadimenti rari dei mesoni B e K; tali decadimenti sono dominati da dinamiche a brevi distanze.

I modi di decadimento del mesone K ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) e ($K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$) offrono la possibilità di testare il modello standard ed approfondire la nostra conoscenza della matrice CKM secondo una modalità completamente indipendente dalla fisica del mesone B.

1.11 Composizione della matrice CKM secondo la parametrizzazione di Wolfenstein

La matrice CKM si può anche riscrivere come segue, secondo la parametrizzazione di Wolfenstein:

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho-i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} + O(\lambda^4)$$

Tale parametrizzazione si avvale di quattro parametri ovvero: λ , ρ , η , A ; essa costituisce una buona approssimazione e lo sviluppo in serie secondo il parametro λ si ferma al terzo ordine.

La parametrizzazione di Wolfenstein rende evidente il fatto che gli elementi della matrice CKM sono tutti legati fra di loro. Allo stato attuale

la conoscenza del valore dell'elemento $|V_{td}|$ deriva essenzialmente da esperimenti riguardanti la fisica del mesone B. In particolare è stato ricavato il valore dell'elemento V_{cb} mediante misure nell'ambito del sistema dei mesoni B; assumendo poi come valida l'ipotesi di unitarietà della matrice CKM si è potuto risalire al valore di V_{td} partendo dalla conoscenza del valore di V_{cb} .

Da questo fatto si può comprendere il motivo per cui è importante effettuare l'esperimento NA62; esso potrà consentire la misura del valore di V_{td} in modo completamente indipendente dalla fisica del mesone B e potrà quindi confermare l'ipotesi di unitarietà della matrice CKM oppure smentirla, nel qual caso si avrebbe una prova a sostegno dell'esistenza di una nuova fisica oltre il modello standard [5].

1.12 Triangolo di unitarietà

Partendo dalla condizione di unitarietà della matrice CKM è possibile scrivere sei condizioni di ortogonalità andando ad effettuare il prodotto di ciascuna colonna per il complesso coniugato di ciascuna altra colonna.

In particolare, nel caso del prodotto fra la prima colonna $[V_{ud}, V_{cd}, V_{td}]^T$ e la terza colonna complessa coniugata $[V_{ub}^*, V_{cb}^*, V_{tb}^*]^T$, si ricava la seguente somma:

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$

Nel piano complesso tale sommatoria si può rappresentare mediante il triangolo di unitarietà, rappresentato alla pagina seguente:

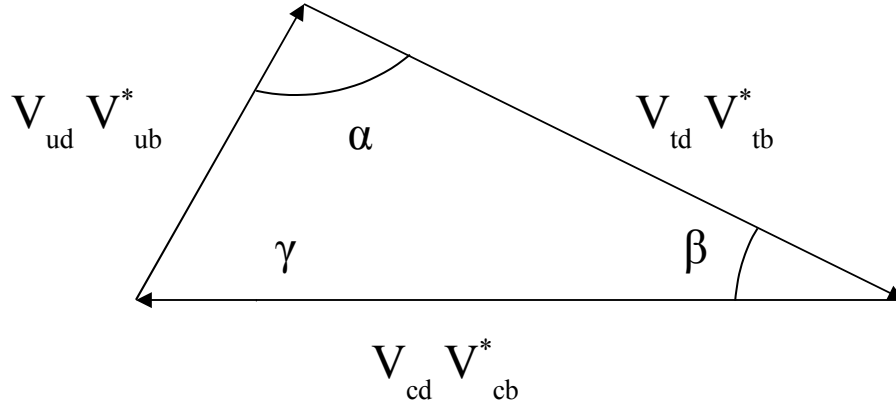


Figura 1.1: triangolo di unitarietà nel piano complesso.

I lati possono essere scalati opportunamente andando a dividerli per la quantità $|V_{cd} V_{cb}^*|$; in tal modo la base assume valore 1 mentre gli altri due lati assumono i valori $|(V_{td} V_{tb}^*)/(V_{cd} V_{cb}^*)|$ e $|(V_{ud} V_{ub}^*)/(V_{cd} V_{cb}^*)|$ rispettivamente. Riprendendo ora in considerazione la parametrizzazione di Wolfenstein, si può ottenere una migliore approssimazione della matrice CKM se si considerano i seguenti parametri modificati:

$$\bar{\rho} = \rho(1-\lambda^2/2)$$

$$\bar{\eta} = \eta(1-\lambda^2/2)$$

In tal modo si possono riottenere i valori dei lati del triangolo di unitarietà nel piano complesso, come specificato di seguito:

$$\bar{\rho} + i\bar{\eta} = (V_{ud} V_{ub}^*)/|(V_{cd} V_{cb}^*)|$$

$$-1 = (V_{cd} V_{cb}^*)/|(V_{cd} V_{cb}^*)|$$

Riscrivendo la condizione di ortogonalità si può ricavare:

$$-V_{ud} V_{ub}^* - V_{cd} V_{cb}^* = V_{td} V_{tb}^*$$

Da cui si deduce la seguente uguaglianza:

$$1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta} = (V_{td} V_{tb}^*) / (V_{cd} V_{cb}^*)$$

Si può riottenere la rappresentazione del triangolo di unitarietà nel piano complesso avvalendosi dei parametri utilizzati nella rappresentazione di Wolfenstein:

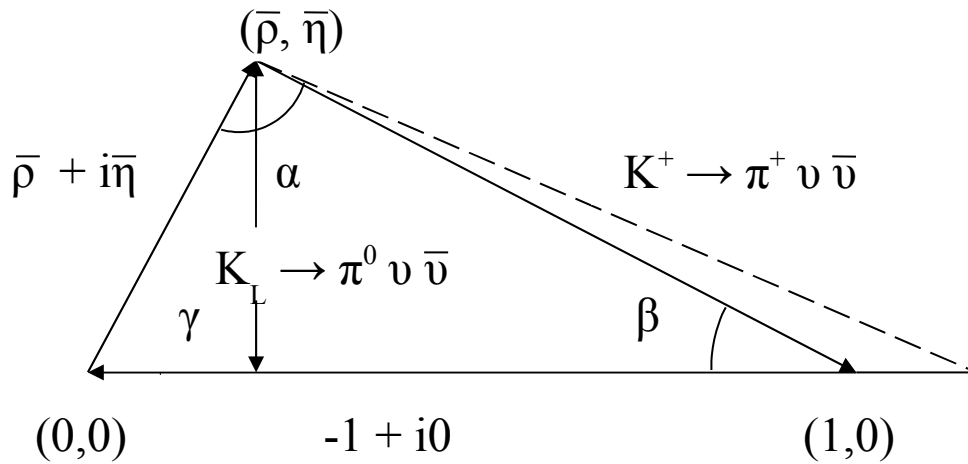


Figura 1.2: triangolo di unitarietà nel piano complesso, espresso tramite i parametri modificati $\bar{\rho}$, $\bar{\eta}$.

La figura precedente permette di evidenziare come il seguente decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ unitamente al decadimento $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ consentano di raggiungere una determinazione del triangolo di unitarietà.

In particolare la linea tratteggiata corrisponde alla misura relativa al decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$; lo scostamento della estremità inferiore della linea tratteggiata dal valore 1 è dovuto al contributo del quark c (charm). La misura diretta dell'altezza η del triangolo di unitarietà si ricava come una misura relativa al decadimento $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$.

Il valore dell'angolo β è noto con grande precisione in quanto esso è stato accuratamente ricavato grazie all'esperimento B-factory che studia la violazione di CP nel decadimento $B \rightarrow \psi K^0$.

Bisogna notare che lo studio dei decadimenti $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$; $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ potrebbe anche fornire risultati differenti rispetto a quanto ricavato dallo studio del mesone B; se ciò avvenisse, sarebbe un indice di fisica al di là del modello standard.

1.13 Tecniche di misura del parametro $|V_{td}|$

I due decadimenti $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$; $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ sono processi molto interessanti per studiare la fisica del flavour. Entrambi i decadimenti sono dominati da dinamiche a breve distanza in cui il contributo dominante è dovuto al quark top; in entrambi i casi è invece trascurabile il contributo del quark up. Per le lunghe distanze, il contributo dovuto al quark charm non è trascurabile per il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ mentre risulta invece trascurabile per il decadimento $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$.

A livello dei quark, i due decadimenti derivano dal processo $s \rightarrow d \nu \bar{\nu}$. Tale processo è illustrabile, nell'ambito del modello standard, mediante i due seguenti diagrammi a pinguino al secondo ordine ed il diagramma a box.

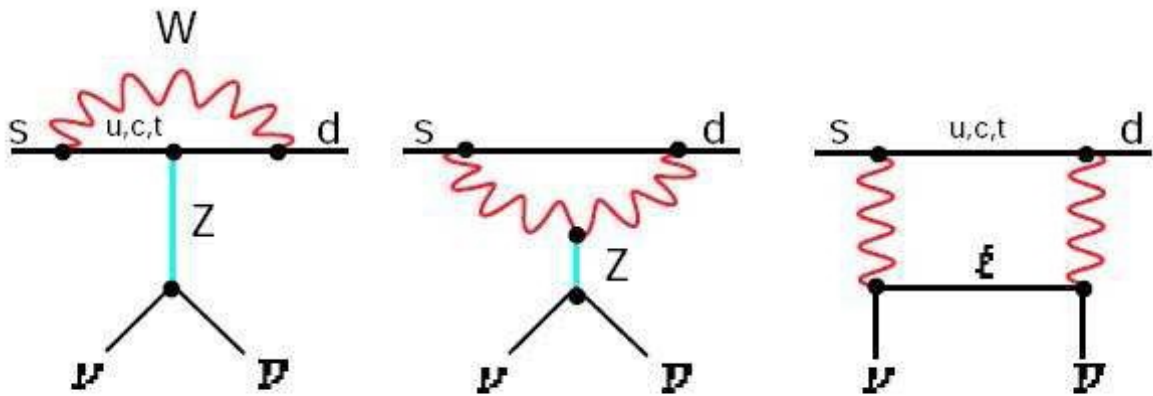


Figura 1.3: grafici di Feynmann per il processo $s \rightarrow d \nu \bar{\nu}$.

Il processo $s \rightarrow d \nu \bar{\nu}$ risulta essere sostanzialmente un processo dominato da dinamiche a breve distanza, descrivibile tramite l'hamiltoniana effettiva:

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = \sum_{l=e,\mu,\tau} \frac{G_l}{2^{1/2}} (\bar{s}d)_{V-A} (\nu\bar{\nu})_{V-A}$$

G_l è la costante di accoppiamento effettiva, ricavata come la media delle costanti di accoppiamento di Yukawa per l'elettrone (G_e), per il muone (G_μ) e per il tauone (G_τ), rispettivamente. L'utilizzo del valore medio dato dalla costante G_l implica un errore trascurabile, pari allo 0.2%.

Nello studio dei decadimenti $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$; $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ si può fare ricorso, per la parte relativa all'interazione forte a grandi distanze, a termini già noti sperimentalmente con grande precisione.

I rapporti di decadimento relativi ai suddetti decadimenti sono riportati alla pagina seguente:

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 6 r_{K^+} \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) |G_1|^2 / (G_F^2 |V_{us}|^2)$$

$$\text{BR}(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = 6 (\tau_{KL}/\tau_{K^+}) r_{KL} \text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) (\text{Im}G_1)^2 / (G_F^2 |V_{us}|^2)$$

r_{K^+} , r_{KL} sono dei termini correttivi che tengono conto di vari effetti fra cui quelli dovuti alla elettrodinamica quantistica QED e valgono $r_{K^+} = 0.901$, $r_{KL} = 0.944$. G_F è la costante di Fermi; il rapporto τ_{KL}/τ_{K^+} rappresenta la normalizzazione rispetto allo spazio delle fasi.

La costante di accoppiamento effettiva G_1 è esprimibile tramite la somma di due contributi, di cui il primo risulta dovuto all'effetto del quark top mentre il secondo risulta dovuto all'effetto del quark charm, come segue:

$$G_1 = \frac{\alpha G_F}{2\pi \sin^2 \theta_W} [V_{ts}^* V_{td} X(x_t) + V_{cs}^* V_{cd} X^1_{NL}]$$

In tale formula si ha $x_t = m_t^2/M_W^2$; inoltre θ_W è l'angolo di Weinberg mentre α è un indice spettrale. Infine i coefficienti X apportano le correzioni dovute alla cromodinamica quantistica QCD.

Il contributo dovuto al quark top è conosciuto con grande precisione; bisogna però tenere presente che vi è un errore dovuto all'attuale incertezza sul valore della massa del quark top.

Il contributo dovuto al quark charm è più piccolo ma risulta affetto da un errore maggiore.

Operando una media rispettivamente alle tre famiglie di neutrini si ricava la funzione $P_0(X)$.

$$P_0(\mathbf{X}) = \frac{1}{\lambda^4} \left[\frac{2 X_{\text{NL}}^e}{3} + \frac{X_{\text{N}}^r}{3} \right]$$

Ne consegue che il parametro V_{td} è ricavato con un errore teorico dell'ordine del $(5 \div 7)\%$ circa. Si può concludere affermando che lo studio del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ risulta essere uno dei più validi sistemi per l'esplorazione del triangolo di unitarietà e degli eventuali gradi di libertà oltre il modello standard.

Capitolo 2

Setup sperimentale e rivelatori

2.1 Principali problematiche legate ad NA62

L'esperimento NA62 utilizza un fascio di mesoni K^+ con quantità di moto $P_K = 75\text{GeV}/c$, prodotti da protoni a $400\text{GeV}/c$ estratti dall'SPS (Super Proton Synchrotron) del CERN.

Tale esperimento vuole studiare il decadimento raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Ci si è prefissati di ottenere un rapporto segnale / fondo $S/B \sim 10$, tenendo presente che l'accettazione geometrica è del 10%.

Le difficoltà che fanno di questo esperimento una sfida tecnologica sono: innanzitutto il branching ratio per il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ risulta dell'ordine di 10^{-11} , quindi notevolmente basso; inoltre fra i suoi prodotti di decadimento vi è una sola particella rivelabile (π^+). Infine vi è un fondo caratterizzato da numerosi canali a due, tre e quattro corpi per cui si rende necessario predisporre dei sistemi opportuni per la reiezione cinematica del fondo, oltre a dispositivi di veto e di identificazione delle particelle.

2.2 Modi di decadimento del mesone K^+

Sappiamo che il branching ratio atteso per il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ è dell'ordine di 10^{-11} ; esso è dunque decisamente basso in confronto con gli

altri decadimenti del mesone K^+ . I più frequenti modi di decadimento del mesone K^+ vengono riportati nella seguente tabella, insieme ai corrispondenti branching ratio e le modalità di reiezione adottate.

<i>Modo di decadimento</i>	<i>Rapporto di decadimento</i>	<i>Modalità di reiezione</i>
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 2}$)	63%	Identificazione del μ , cinematica a due corpi
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	21%	Veto per fotoni, cinematica a due corpi
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	6%	Veto di particelle cariche, cinematica
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	2%	Veto per fotoni, cinematica
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 3}$)	3%	Veto per fotoni, Identificazione del μ
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ ($K_{e 3}$)	5%	Veto per fotoni, E/p

Tabella 2.1: principali modi di decadimento del mesone K^+ , corrispondenti rapporti di decadimento e modalità di reiezione adottate.

Nei prossimi paragrafi verranno discusse le modalità di reiezione che sono state predisposte al fine di eliminare il fondo dovuto ai canali indesiderati.

2.3 Decadimenti a due corpi, reiezione cinematica del fondo

Fra le varie modalità di reiezione adottate per discriminare fra il segnale utile ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$) e i decadimenti a due corpi $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ (BR = 63%); $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ (BR = 21%) un ruolo prevalente è ricoperto dal sistema di reiezione cinematica del fondo (Two-Body Kinematics).

La reiezione cinematica del fondo riesce a discriminare fra segnale utile e fondo basandosi sulla misura di alcuni parametri:

- P_K = quantità di moto del mesone K^+ ;
- P_π = quantità di moto del pione π^+ ;
- $\theta_{\pi K}$ = angolo fra la particella madre (K^+) e la particella figlia (π^+).

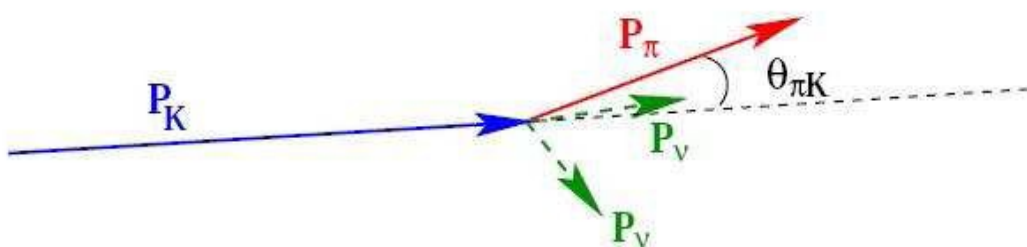


Figura 2.1: cinematica del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$.

Viene utilizzato il valore al quadrato della massa mancante m_{miss}^2 (ovvero la massa dei prodotti di decadimento non rivelati come traccia dall'apparato sperimentale) la quale viene definita ritenendo valida

l'ipotesi che la particella carica rivelata nello stato finale sia un pione π^+ .
 La grandezza m^2_{miss} viene costruita sulla base dei parametri P_K , P_π , $\theta_{\pi K}$.

$$m^2_{\text{miss}} \approx m^2_K \left[1 - \frac{|P_\pi|}{|P_K|} \right] + m^2_\pi \left[1 - \frac{|P_K|}{|P_\pi|} \right] + |P_K||P_\pi| \theta^2_{\pi K}$$

La seguente figura riporta la distribuzione della grandezza m^2_{miss} per un fascio di mesoni K^+ aventi quantità di moto $P_K = 75\text{GeV}/c$.

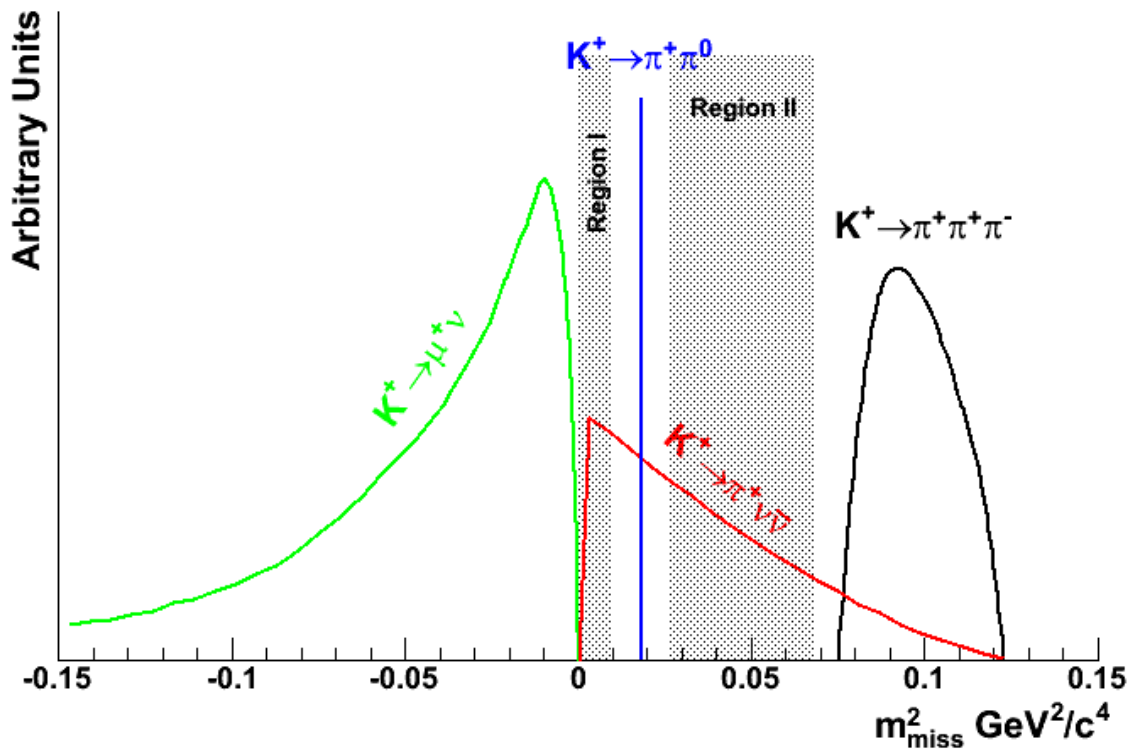


Figura 2.2: grafici delle distribuzioni della grandezza m^2_{miss} relativamente al canale di interesse ed ai più probabili modi di decadimento del mesone K^+ .

Per il decadimento a due corpi ($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$) ci si aspetterebbe un unico valore di m^2_{miss} ; il grafico mostra invece una distribuzione di massa non centrata su un unico valore $m^2_{\text{miss}} = m^2_\nu = 0$. Il neutrino, che non è rivelabile, sottrae comunque, nel centro di massa, un momento di valore identico a quello del muone.

Una ulteriore ragione per cui si ottiene una curva di distribuzione e non un unico valore di picco risiede nel fatto che nella definizione della grandezza m^2_{miss} si è imposta a priori l'ipotesi che la particella carica rivelata nello stato finale sia un pione π^+ . E' comunque possibile escludere tale decadimento se si impone la condizione $m^2_{\text{miss}} > 0$.

Per il decadimento a due corpi ($K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$) il grafico mostra una distribuzione di massa centrata sull'unico valore $m^2_{\text{miss}} = m^2_{\pi^0}$. In questo decadimento, a differenza del caso precedente, la particella carica rivelata nello stato finale è effettivamente un pione π^+ . Inoltre il pione neutro π^0 si rivela. Bisogna infine tenere presente la risoluzione di massa Δm per la grandezza m^2_{miss} .

A questo punto si può ricavare la regione di segnale come l'unione delle due regioni seguenti:

- Regione I: $0 < m^2_{\text{miss}} < m^2_{\pi^0} - (\Delta m)^2$
- Regione II: $m^2_{\pi^0} + (\Delta m)^2 < m^2_{\text{miss}} < \min [m^2_{\text{miss}}(\pi^+\pi^+\pi^-)] - (\Delta m)^2$

La reiezione del fondo ottenuta con questi vincoli cinematici è pari al 92%. E' possibile ottenere un rapporto segnale / fondo $S/B \geq 10$ con una accettazione di segnale $> 10\%$ se si è in grado di ottenere la seguente risoluzione di massa $(\Delta m)^2 \approx 8 * 10^{-3} \text{GeV}^2/c^4$.

Inoltre, se si raggiunge una risoluzione della quantità di moto del mesone K^+ dello 0.3%, una risoluzione della quantità di moto del pione π^+ pari ad

almeno l'1% con $P_\pi = 30\text{GeV}/c$ ed una risoluzione per l'angolo $\theta_{\pi K}$ di $(50\div 60)\mu\text{rad}$, si riesce ad ottenere una risoluzione per m_{miss}^2 sufficiente per ottenere una selezione cinematica del fondo al livello richiesto.

Le risoluzioni richieste definiscono quali devono essere le caratteristiche tecniche e le prestazioni dei due principali dispositivi utilizzati nel sistema di tracciamento ovvero i rivelatori a pixel di silicio (GigaTracker) e lo spettrometro magnetico (Straw Tracker), incaricati della misurazione delle quantità di moto delle particelle.

Sono previste tre stazioni di rilevamento GigaTracker per la misurazione della quantità di moto P_K dei mesoni K^+ e della quantità di moto P_π dei pioni π^+ .

Le misure effettuate vengono abbinate con le informazioni fornite dallo spettrometro Straw Tracker, il quale è progettato per minimizzare i fenomeni di diffusione multipla dei pioni π^+ ; in tal modo si riesce a pervenire alla ricostruzione degli eventi.

2.4 Decadimenti a tre e quattro corpi, PID (Particle IDentification) e rivelatori di fotoni

I decadimenti a due corpi del mesone K^+ costituiscono complessivamente l'84% del fondo; è comunque essenziale prevedere dei sistemi per la soppressione del fondo residuo, dovuto ai decadimenti a tre e quattro corpi del mesone K^+ .

Si devono prendere in considerazione i decadimenti $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ (BR = 6%); $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ (BR = 2%); $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ (BR = 3%); $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ (BR = 5%).

La figura seguente riporta il grafico dell'angolo $\theta_{\pi K}$ in funzione del momento P_π per un fascio di mesoni K^+ aventi la quantità di moto pari a $P_K = 75 \text{ GeV}/c$.

Il grafico in figura prende in considerazione i decadimenti più comuni del mesone K^+ ed il decadimento raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$. Per i decadimenti a tre corpi le curve mostrano il limite cinematico.

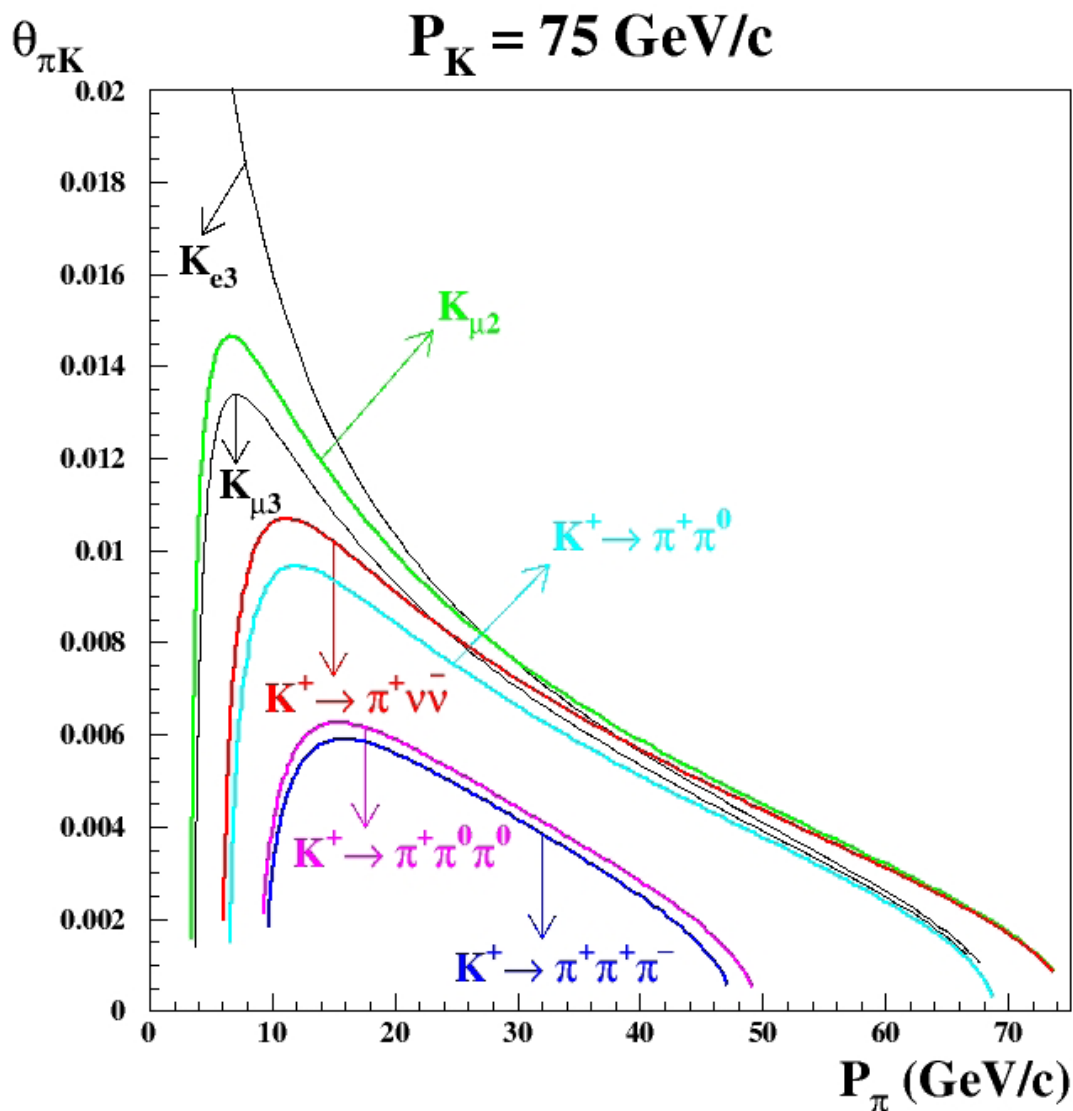


Figura 2.3: grafico delle distribuzioni dell'angolo $\theta_{\pi K}$ in funzione della quantità di moto P_π relativamente ai principali modi di decadimento del mesone K^+ ed al decadimento di interesse.

La seguente figura riporta la distribuzione della grandezza m_{miss}^2 per un fascio di mesoni K^+ aventi quantità di moto $P_K = 75\text{GeV}/c$; vengono presi in considerazione i decadimenti a tre e quattro corpi.

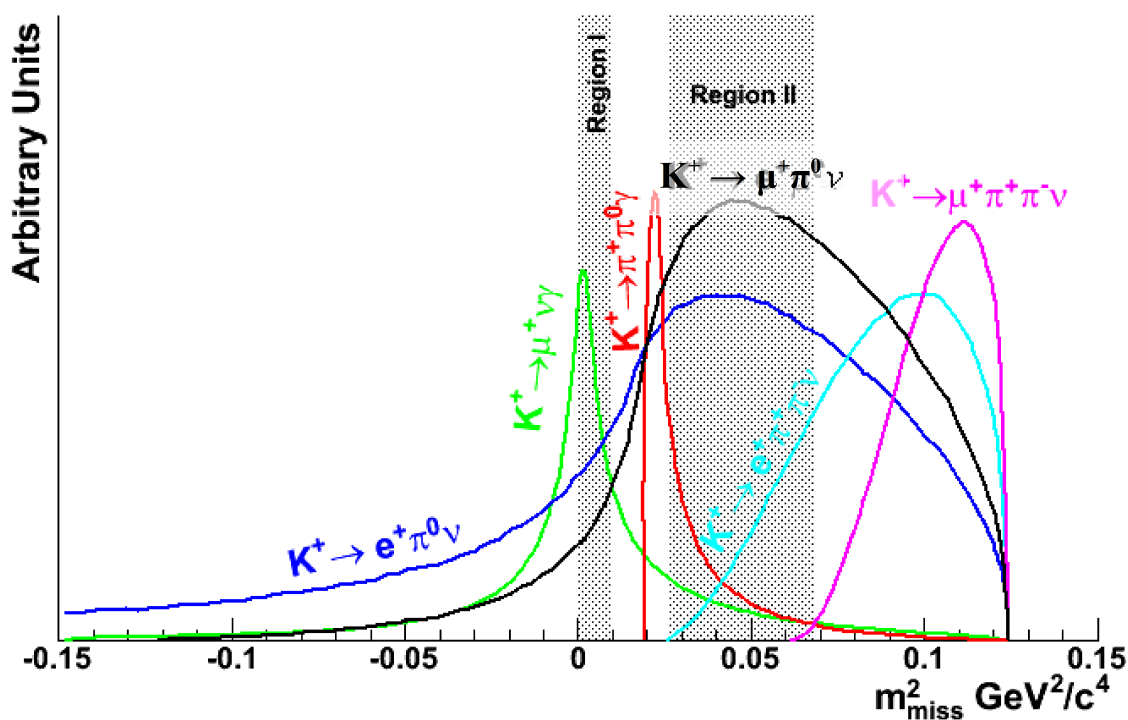


Figura 2.4: grafici delle distribuzioni della grandezza m_{miss}^2 relativamente ai modi di decadimento a tre e quattro corpi del mesone K^+ .

Questi decadimenti costituiscono un fondo residuo (nella misura dell'8%), che cioè è ancora presente dopo l'applicazione del sistema di reiezione cinematica del fondo (Two-Body Kinematics).

Il fondo residuo è cinematicamente compatibile con il segnale e si distribuisce all'interno della regione di segnale definita al paragrafo

precedente: per riuscire a discriminare fra segnale e fondi si debbono utilizzare dei sistemi per l'identificazione delle particelle PID (Particle IDentification) e sistemi per la rivelazione dei fotoni γ . In particolare le particelle identificabili mediante sistemi di Particle IDentification sono i muoni, i pioni ed i positroni.

Bisogna poi considerare anche altri decadimenti del mesone K^+ , ancora presenti dopo l'applicazione dei sistemi di reiezione cinematica del fondo: in dettaglio si hanno $K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu$; $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$; $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori di accettazione ed efficienza (η) richiesti al fine di ottenere il rapporto segnale / fondo richiesto.

	$K^+ \rightarrow e^+ \pi^0 \nu$	$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$	$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$
Branching Ratio	$4.87 * 10^{-2}$	$5.50 * 10^{-3}$	$2.75 * 10^{-4}$
Acceptance	13.4%	15.3%	17.9%
η_{μ}	-	10^{-5}	-
η_{π^0}	$5 * 10^{-8}$	-	$5 * 10^{-8}$
η_{γ}	-	$2 * 10^{-4}$	10^{-3}
$\eta_{\pi e}$	10^{-3}	-	-
S/B Ratio	30	5	4000

Tabella 2.2: valori di accettazione ed efficienza (η) richiesti per ottenere il rapporto segnale / fondo richiesto, relativamente a dei modi di decadimento ancora presenti dopo l'applicazione dei sistemi di reiezione cinematica del fondo.

Una ulteriore necessità è quella di rendere il rivelatore ermetico riguardo ai fotoni originati dal decadimento del pione neutro $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ all'interno della regione di segnale: a tal fine vengono utilizzate multiple stazioni di veto per fotoni.

A questo punto rimangono ancora alcuni decadimenti a quattro corpi come $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu$; $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu$; che hanno branching ratio dell'ordine di 10^{-5} . Analogamente al caso dei fotoni, è necessario rendere ermetico il rivelatore nei confronti di particelle cariche negativamente con quantità di moto inferiore a 60GeV/c: a tal fine si è scelto di utilizzare uno spettrometro magnetico singolo, formato da un magnete e quattro detector (Straw Chambers).

2.5 Legame fra fascio primario di protoni e fascio secondario di mesoni K

L'esperimento NA62 sarà installato nella North Area dell'SPS (Super Proton Synchrotron) presso il CERN; qui i protoni di alta energia vengono indirizzati contro un bersaglio fisso di berillio (stazione bersaglio T10); ne consegue la produzione (tra gli altri) di un elevatissimo numero di pioni π^+ , un elevato numero di mesoni K^+ ed un limitato numero di mesoni K^- .

Nel caso di protoni primari di momento P_0 , si ottiene la produzione massima di mesoni K^+ se si assume $P_K \sim 0.35P_0$; la produzione massima di mesoni K^- si ottiene invece assumendo $P_K \sim 0.23P_0$.

Inoltre se si mantiene il rapporto P_K/P_0 ad un valore fissato, la produzione di mesoni K sia positivi che negativi cresce all'aumentare di P_K^2 (e quindi con P_0^2).

Ne consegue che il numero di decadimenti dei mesoni K^+ per una fissata lunghezza è massima in corrispondenza di $P_K \sim 0.23P_0$ mentre il numero di decadimenti dei mesoni K^- per una fissata lunghezza è massima in corrispondenza di $P_K \sim 0.15P_0$.

Inoltre per un fissato rapporto P_K/P_0 il numero di decadimenti di mesoni K^+ e K^- per una determinata lunghezza cresce all'aumentare di P_K (e quindi con P_0).

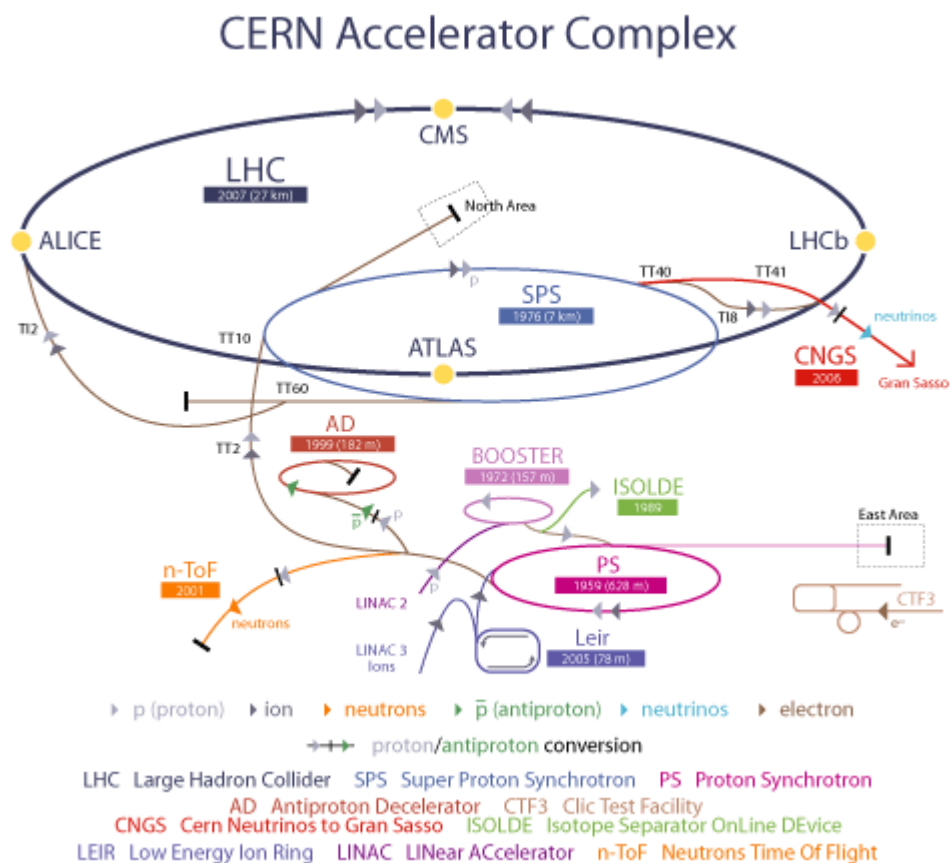


Figura 2.5: schema del complesso di acceleratori di particelle presenti al CERN.

2.6 Motivazioni alla base della scelta di un fascio secondario costituito da mesoni K positivi

Utilizzando un fascio di protoni con quantità di moto $P_0 = 400\text{GeV}/c$, si ottengono i valori seguenti relativamente ai tassi di produzione di mesoni K positivi e negativi in corrispondenza del target di berillio:

- $(K^+/K^-) \approx 2.1$
- $((K^+/\pi^+)/(K^-/\pi^-)) \approx 1.2$
- $(K^+/\text{flusso totale del fascio positivo})/(K^-/\text{flusso totale del fascio negativo}) \approx 1.0$

Da questi valori risulta evidente che è opportuno scegliere di utilizzare un fascio di mesoni K^+ come fascio secondario piuttosto che un fascio di mesoni K^- .

Sarebbe inoltre opportuno utilizzare un fascio di protoni di alta energia in modo da poter estrarre un fascio di mesoni K^+ di alta energia. E' così possibile riuscire a migliorare i valori di accettazione, efficienza e risoluzione dei rivelatori dedicati al veto di fotoni, dei calorimetri e dei rivelatori di muoni.

2.7 Collimazione e selezione del fascio

Il fascio di mesoni K^+ ad elevata energia viaggia attraverso la linea di fascio K12, ovvero una struttura appositamente progettata e costituita da

una successione di elementi il cui utilizzo [6] viene discusso nel seguito del presente paragrafo.

Innanzitutto sono presenti tre magneti quadrupolari resistenti alla radiazione, che hanno il compito di raccogliere con il massimo valore possibile di accettazione angolare il fascio di mesoni K^+ ; in tal modo se ne ottiene una buona focalizzazione.

A seguire è previsto un correttore acromatico (front-end achromat) costituito da quattro magneti dipolari (MTRV) resistenti alla radiazione, allo scopo di consentire la selezione del momento e la ricombinazione: la prima coppia di dipoli provvede a deflettere verticalmente il fascio di 100mm, corrispondentemente alla posizione intermedia del correttore acromatico stesso.

Dopodichè entra in gioco un dispositivo denominato TAX che consiste essenzialmente in una slitta su cui far convergere i protoni primari e gli indesiderati adroni secondari; la slitta provvede ad eliminare eventuali effetti di bordo sul fascio oltre a permettere la selezione del fascio in base ad una stretta banda di momento ($\approx 1\% \Delta p/p$).

Infine la seconda coppia di dipoli si occupa di riportare il fascio a banda stretta sulla posizione originale dell'asse verticale. A questo punto sono previsti tre magneti quadrupolari che provvedono alla rifocalizzazione del fascio di particelle su entrambi i piani, orizzontale e verticale. Successivamente ad essi sono dislocati tre magneti dipolari il cui scopo è quello di far deviare i muoni lontano dal fascio.

Seguono altri due magneti quadrupolari che rendono il fascio parallelo all'asse di un contatore Cherenkov differenziale (CEDAR) modificato, in quanto riempito con gas di idrogeno H_2 ; il CEDAR è predisposto alla rivelazione dei mesoni K^+ presenti nel fascio.

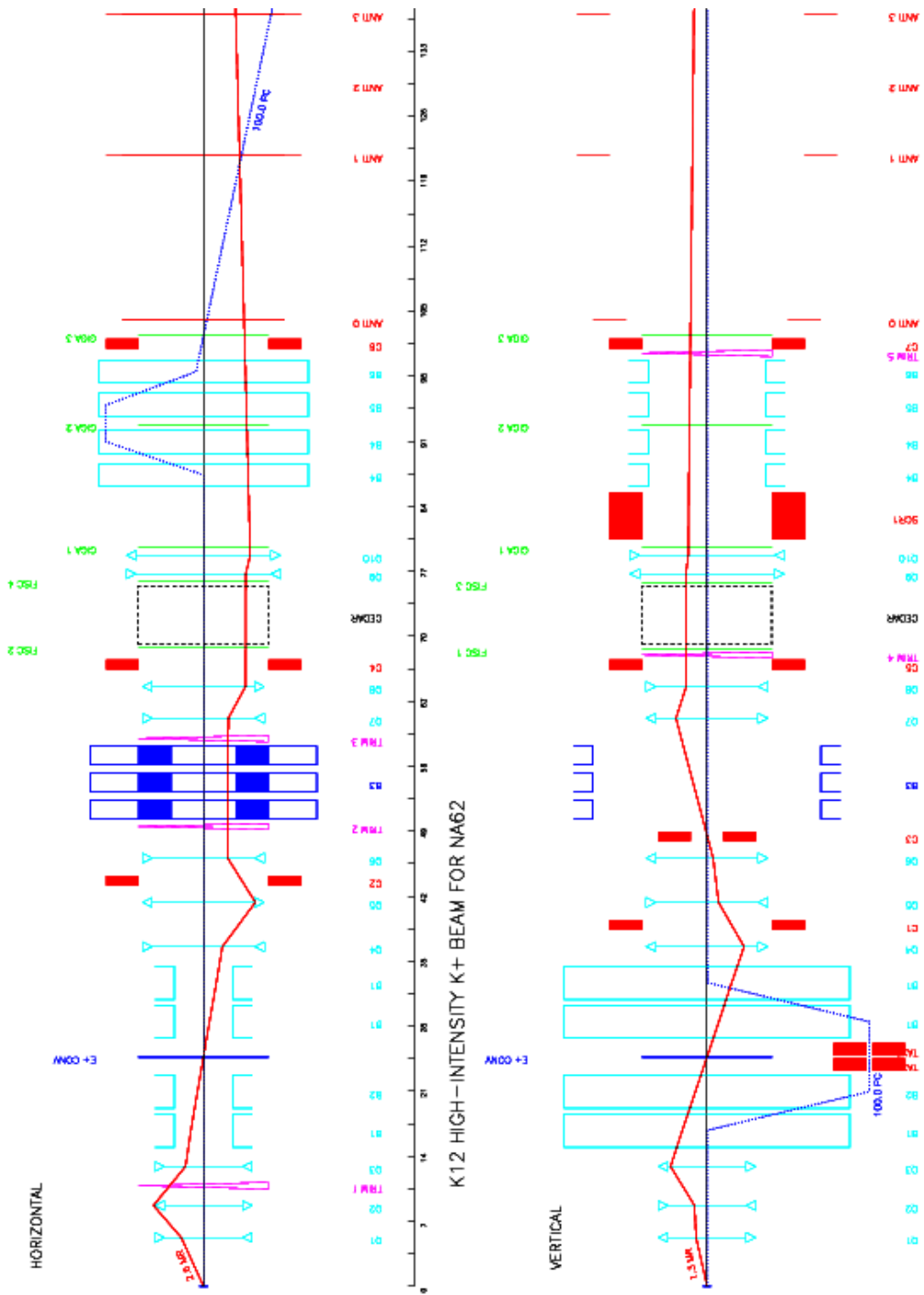


Figura 2.6: schema dell'ottica della linea di fascio K12, relativa al fascio di mesoni K^+ di elevata intensità utilizzato nell'esperimento NA62; a sinistra ne viene rappresentato il piano orizzontale mentre a destra ne viene rappresentato il piano verticale.

Per finire, sono previsti altri due magneti quadrupolari, onde adattare il fascio allo spettrometro magnetico (Straw Tracker) ed al sistema di tracciatura (formato da tre stazioni GigaTracker) a seguire.

Nell'ultima zona che precede il collimatore finale è dislocato un altro correttore acromatico costituito da quattro magneti dipolari e sono anche presenti due magneti toroidali, che servono a defocalizzare i muoni μ^+ dal fascio.

2.8 CEDAR (ChErenkov Differential counter with Achromatic Ring focus)

Il CEDAR è un contatore Cherenkov differenziale che viene utilizzato al fine di discriminare fra i mesoni K^+ e le altre particelle cariche presenti nel fascio, in particolare i pioni π^+ .

Questo è particolarmente importante, in quanto bisogna prevenire la possibilità che l'interazione fra un pione ed il gas residuo all'interno della camera a vuoto possa essere erroneamente considerato come un segnale utile. Nelle pagine a seguire viene ricordato sinteticamente l'effetto Cherenkov.

Dalla teoria della relatività sappiamo che la velocità a cui si muove una qualsiasi particella non può mai essere superiore al valore della velocità della luce nel vuoto ($c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$).

Si consideri ora un mezzo caratterizzato dall'indice di rifrazione n : la velocità a cui si propaga la luce in tale mezzo è data dal rapporto c/n , quindi risulta inferiore a c , visto che la disuguaglianza seguente $n > 1$ è sempre verificata.

Si sceglie un materiale (idrogeno gassoso in questo caso) in cui per esempio i pioni π^+ dovrebbero viaggiare ad una velocità superiore a quella della luce nel materiale stesso; però, non potendolo fare, essi emettono radiazione luminosa con un cono di apertura proporzionale alla loro velocità.

Un parametro particolarmente importante di cui tener conto, noto come angolo di Cherenkov ed indicato col simbolo θ , si ricava dalla relazione seguente:

$$\cos\theta = \frac{1}{n} \frac{c}{v}$$

L'angolo di Cherenkov relativo ai pioni è superiore rispetto a quello relativo ai kaoni; analogamente l'angolo di Cherenkov relativo ai kaoni è superiore rispetto a quello relativo ai protoni.

Come mezzo viene scelto un gas di densità tale da rendere più grande possibile la differenza fra tali angoli: nel presente caso si è scelto l'idrogeno.

Con riferimento alla figura della pagina seguente si può notare che la luce Cherenkov prodotta dal passaggio delle particelle nel gas viene riflessa da uno specchio, poi raggiunge la lente di un correttore acromatico ed infine incontra un diaframma.

Tale diaframma può essere regolato in modo da impedire il passaggio della luce originatasi dall'interazione di pioni π^+ e protoni p^+ con il gas: la conseguenza è che riesce a passare soltanto la luce generata dall'interazione dei mesoni K^+ con il gas.

Questa luce raggiunge dei successivi fotomoltiplicatori PMT (Photo Multiplier Tube) che consentono la lettura dei segnali; il segnale generato

viene inviato all'elettronica esterna tramite un convertitore analogico-digitale ADC (Analog to Digital Converter) di elevate prestazioni, ad 8 bit e con frequenza di clock $f_{CK} = 1\text{GHz}$.

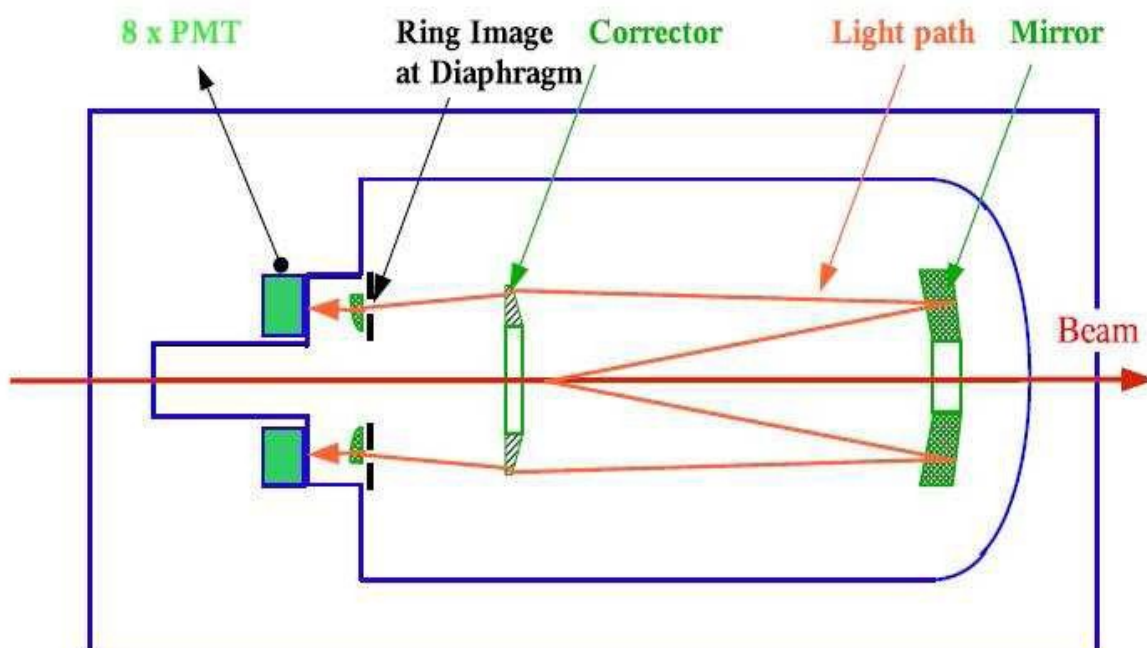


Figura 2.7: schema di funzionamento del contatore CEDAR.

In realtà gli attuali fotomoltiplicatori PMT potrebbero essere inadeguati a fronte della notevole frequenza di eventi (50MHz) che ciascuno di essi dovrebbe essere in grado di rilevare.

Inoltre la superficie che deve venir letta da ciascun fotomoltiplicatore PMT è piuttosto elevata e vale 7mm^2 ; per migliorare l'efficienza di lettura si prevede di utilizzare dei fotomoltiplicatori multi-anodo a 32 canali. La figura alla pagina seguente illustra l'immagine generata dalla luce rilevata dai fotomoltiplicatori.

Esistono due versioni di contatore CEDAR: il North CEDAR è normalmente riempito di elio gassoso ed è ottimizzato per rivelare particelle di alta energia mentre il West CEDAR è normalmente riempito di azoto gassoso ed è ottimizzato per rivelare particelle di più bassa energia.

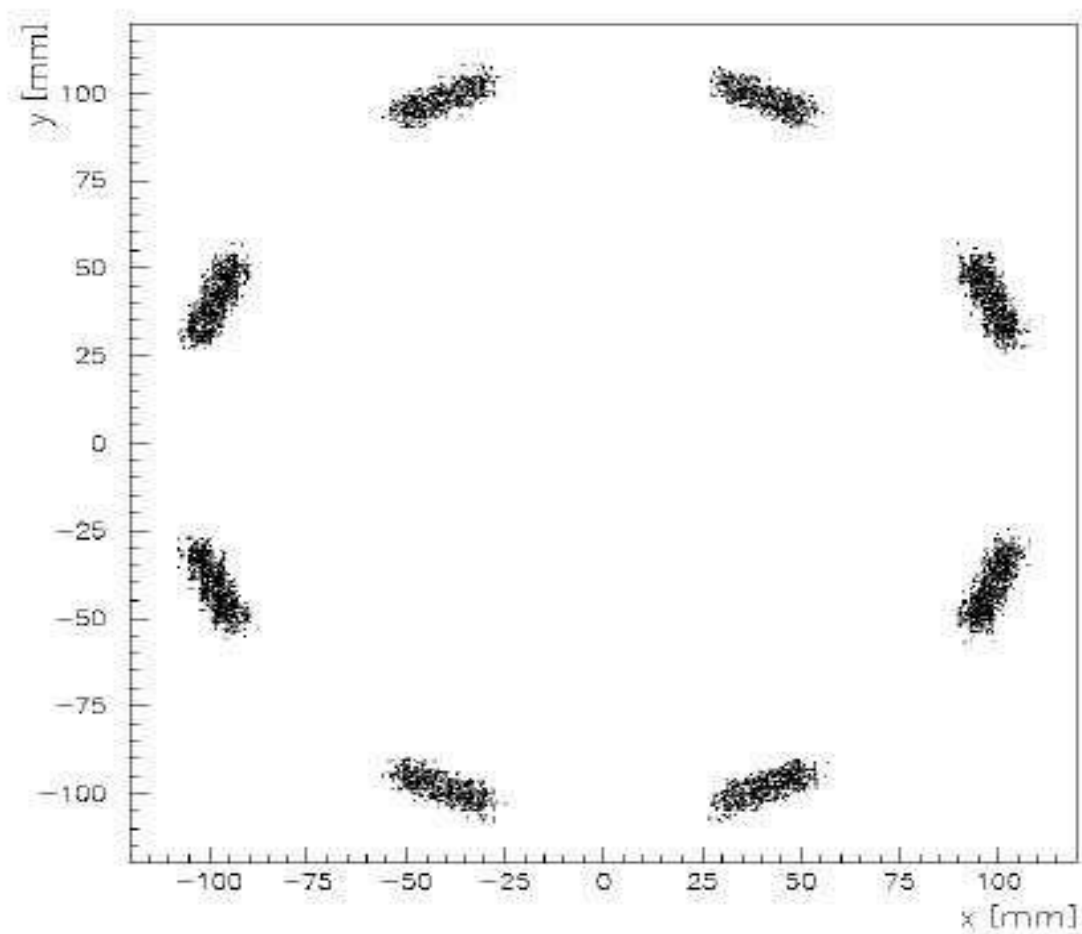


Figura 2.8: immagine bidimensionale ottenuta per mezzo della luce Cherenkov raccolta dai tubi fotomoltiplicatori.

Dopo opportune verifiche si è giunti alla conclusione che per il presente esperimento risulta maggiormente indicato il West CEDAR, riempito con

gas di idrogeno anziché azoto, dato che così si riduce in modo significativo la diffusione delle particelle del fascio mentre attraversano il gas.

2.9 Misura della direzione e del momento delle particelle del fascio

Per misurare il momento e la direzione delle particelle del fascio si utilizza un sistema di tracciatura costituito da tre stazioni di rilevamento denominate GigaTracker (GTK1, GTK2, GTK3), ciascuna delle quali è composta da una matrice di pixel in silicio (Si). Tali stazioni sono dislocate all'interno di un tubo a vuoto, posto in corrispondenza dell'ingresso della camera a vuoto, la quale contiene l'apparato sperimentale.

La misura del momento richiede di sfruttare un campo magnetico appositamente generato da un correttore acromatico (second achromat): esso risulta costituito da quattro magneti dipolari (MCBH) a forma di C. Bisogna notare che, in corrispondenza della posizione centrale del secondo correttore acromatico, il fascio viene deviato sul piano orizzontale di una distanza pari a 60mm; il fascio deviato può così attraversare la seconda stazione GTK2 al fine di ottenere la misura dell'impulso delle particelle.

2.10 Camera a vuoto ed apparato sperimentale

Il fascio di kaoni viaggia prevalentemente nel vuoto, dal bersaglio in berillio fino alla fine, generalmente in una beam pipe; nella zona di

decadimento la camera raggiunge un diametro dai 2m ai 2.5m mentre nella zona dello Straw Tracker raggiunge i 3m. Susseguentemente un tubo a vuoto di 20cm di diametro raccoglie il fascio nel vuoto attraverso i rivelatori dei decadimenti.

Per separare nel fascio positivo i pioni π^+ dai mesoni K^+ , nella beam pipe è inserito un rivelatore CEDAR (ChErenkov Differential counter with Achromatic Ring focus).

Ad esso seguono tre stazioni GigaTracker (GTK1-2-3), le quali sono dei rivelatori formati da una matrice a pixel di silicio. Le stazioni GigaTracker si occupano della misurazione del momento e della direzione delle particelle.

La zona di decadimento dei K^+ è contornata da una serie di contatori ANTI a forma di anello, altresì noti come stazioni LAV (Large Angle Photon Veto stations): essi fanno parte di un sistema di veto per fotoni ed altre particelle prodotte nel decadimento; in particolare si occupano del veto dei fotoni emessi nella regione angolare compresa fra 8.5mrad e 50mrad. Segue uno spettrometro magnetico singolo, anche noto col nome di Straw Tracker: esso comprende quattro camere di tracciatura per la misura della direzione e del momento dei pioni.

Le camere di tracciatura, anche queste sotto vuoto, sono composte da straw-tubes (ST-CH-1-4) e sono intervallate da un magnete dipolare denominato MNP33. Tale magnete fornisce una deflessione nominale di +3.6mrad per il fascio di particelle; esso permette di misurare il momento delle particelle dei decadimenti. Il fascio deviato viene mandato in una beam pipe di circa 20cm di diametro, mantenuta sotto vuoto, per evitare interazioni dei K^+ con i rivelatori e con l'aria. Le particelle dei decadimenti investono i rivelatori, a cominciare dal RICH. Esso è un grosso rivelatore Cherenkov a grande accettazione, il quale discrimina fra pioni e muoni.

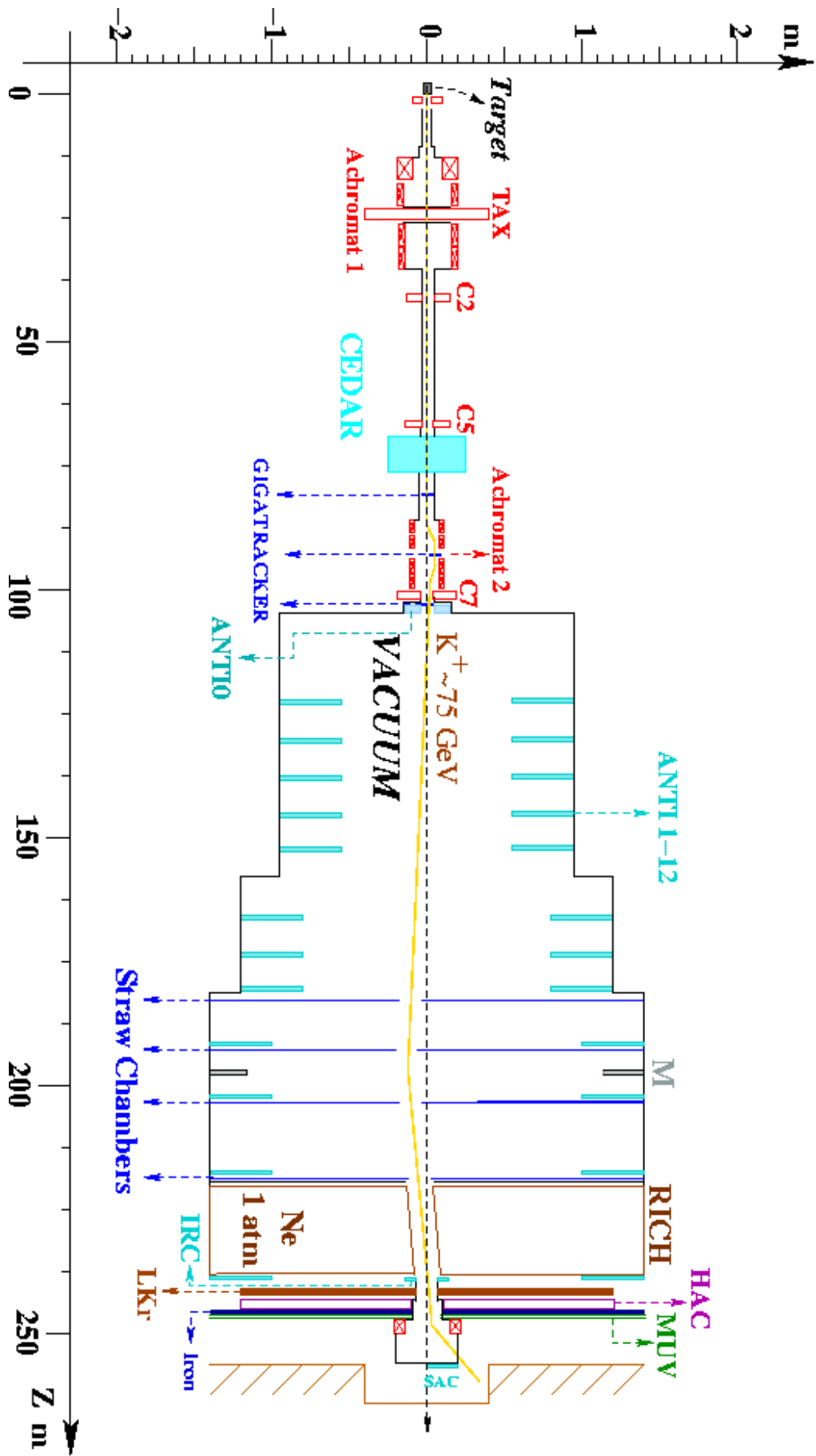


Figura 2.9: schema dell'apparato sperimentale e della camera a vuoto.

Dopodiché le particelle giungono sul calorimetro LKR (Liquid KRypton calorimeter): si tratta di un calorimetro elettromagnetico facente parte del sistema di veto per fotoni ed elettroni. Esso è predisposto per anticoincidere i fotoni nella regione angolare compresa fra 1.0mrad e 15.0mrad. Il calorimetro LKR ha un'ottima risoluzione energetica ed è già stato utilizzato nell'esperimento NA48.

Nella zona seguente a quella del calorimetro LKR viene predisposto un calorimetro adronico HAC (HADron Calorimeter), per avere una ulteriore discriminazione fra i pioni e i muoni. A questo punto il fascio di K^+ viene nuovamente deflesso mediante l'ausilio di un magnete dipolare IHEP lungo 3m, per eliminarlo dalla zona. Il trigger, comando elettronico per l'acquisizione dei dati e dei valori dei rivelatori per ogni evento, è formato dai segnali del CEDAR, dei GigaTracker, del RICH, dell'odoscopio CHOD (costituito da una matrice di semplici contatori a scintillazione) e dell'LKR. Evidentemente il trigger è anticoinciso da tutte le altre anticoincidenze, comprese quelle del LAV e del MUV.

Nella zona terminale della camera a vuoto sono presenti i calorimetri IRC (Intermediate Ring Calorimeter) e SAC (Small Angle photon veto Calorimeter). L'insieme dei due calorimetri IRC e SAC serve a completare il sistema di veto per fotoni; in particolare essi sono predisposti per effettuare il veto dei fotoni emessi con un angolo inferiore ad 1.0mrad.

2.11 Sistema di veto per fotoni

Sappiamo che il modo di decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ha un branching ratio notevole (pari al 21%) e che i pioni neutri originatisi di conseguenza

decadono secondo il seguente modo di decadimento $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$; ne deriva che il sistema di selezione cinematica del fondo dovrà porre particolare cura riguardo alla soppressione del rilevante fondo dovuto ai fotoni γ . All'interno della regione di decadimento (e non solo) è stata quindi posizionata la stazione di veto per fotoni γ , costituita da un insieme di rivelatori di cui si discuterà nei seguenti paragrafi.

Il calorimetro SAC (Small Angle photon veto Calorimeter) ed il calorimetro IRC (Intermediate Ring Calorimeter) si occupano congiuntamente del veto dei fotoni emessi con piccoli angoli ($\varphi < 1\text{mrad}$) e costituiscono quindi l'apparato SAV (Small Angle Vetoes).

Il calorimetro LKR (Liquid KRipton calorimeter) si occupa del veto di fotoni emessi ad angoli intermedi ($1\text{mrad} < \varphi < 8.5\text{mrad}$).

L'apparato ANTI, noto anche come LAV (Large Angle Vetoes), si occupa del veto dei fotoni emessi con angoli elevati ($8.5\text{mrad} < \varphi < 50\text{mrad}$); esso è formato da una dozzina di contatori posizionati ad intervalli opportuni lungo l'intera camera a vuoto.

Il sistema complessivo di detector per fotoni è progettato per assicurare un veto ermetico per un angolo inferiore a $\varphi = 50\text{mrad}$ relativamente ai fotoni originatisi nella regione fiduciale per il decadimento dei mesoni K^+ . Tale regione fiduciale viene riportata nella figura alla pagina seguente; in essa si mostrano inoltre in quali posizioni vengono disposti i rivelatori SAC, IRC, LKR, ANTI (ovvero LAV). Per i vari rivelatori viene illustrata la relativa copertura angolare o veto.

Nei paragrafi a seguire vengono trattate in dettaglio le possibili soluzioni tecnologiche adottabili per la costruzione dei calorimetri SAC ed IRC: in particolare vengono discussi sia il calorimetro a campionamento Shashlyk che il calorimetro omogeneo PbWO_4 . Inoltre viene trattato il calorimetro

LKR. Viene discussa altresì la tecnologia dei moduli con vetri al piombo, scelta per la realizzazione dei contatori ANTI.

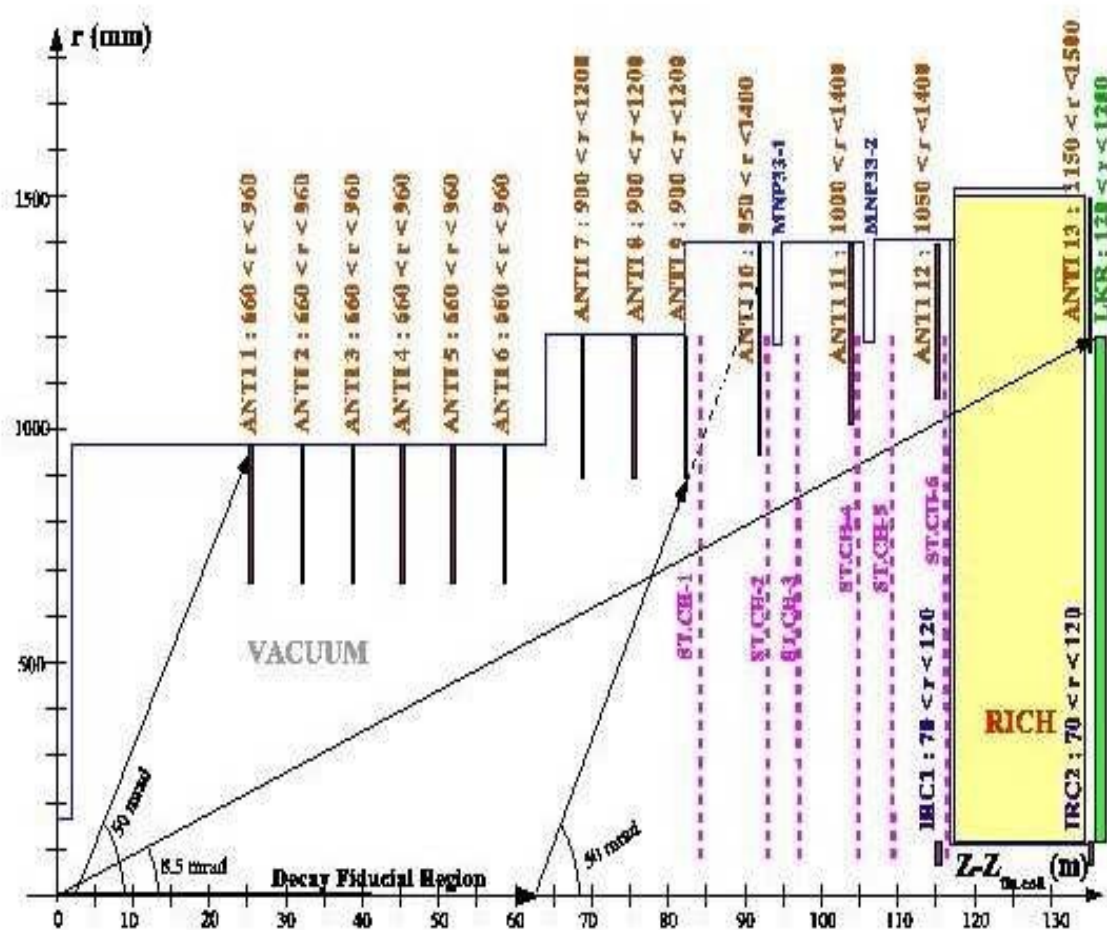


Figura 2.10: schema del sistema di veto per fotoni; la figura illustra in quali zone della camera a vuoto vengono posizionati i calorimetri SAC, IRC, LKR ed i contatori ANTI; inoltre ne vengono mostrate le relative coperture angolari.

2.11.1 SAV (Small Angle Vetoes)

L'apparato SAV (Small Angle Vetoes) utilizza innanzitutto un calorimetro SAC (Small Angle Calorimeter); inoltre il SAV sfrutta un calorimetro IRC

(Intermediate Ring Calorimeter), il quale risulta composto dai calorimetri IRC-1 ed IRC-2. I calorimetri SAC ed IRC sono progettati per imporre il veto dei fotoni con energie comprese nell'intervallo $(5 \div 70)$ GeV.

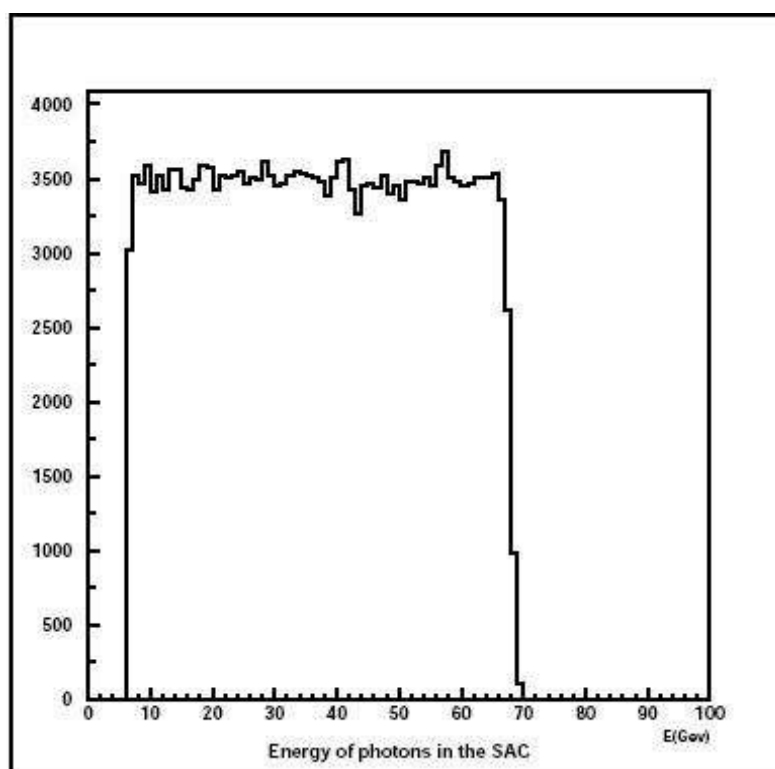


Figura 2.11: distribuzione di energia nel calorimetro SAC

L'azione combinata dei calorimetri SAC ed IRC consente di ottenere il veto di fotoni emessi a piccoli angoli ($\varphi < 1$ mrad).

Il calorimetro SAC è adibito al veto dei fotoni emessi con un angolo nullo; tale calorimetro ha un diametro di 100mm. Il SAC viene posizionato alla fine della regione di decadimento dei mesoni K^+ in modo che si eviti qualsiasi interazione fra rivelatore stesso e particelle cariche. Bisogna notare che infatti le particelle cariche non arrivano fino a questa zona, in

quanto già deflesse precedentemente. Il calorimetro IRC-1 circonda il centro della camera a vuoto e precede una zona lunga 18m riempita di gas, necessaria per il contatore RICH (Ring Imaging CHerenkov).

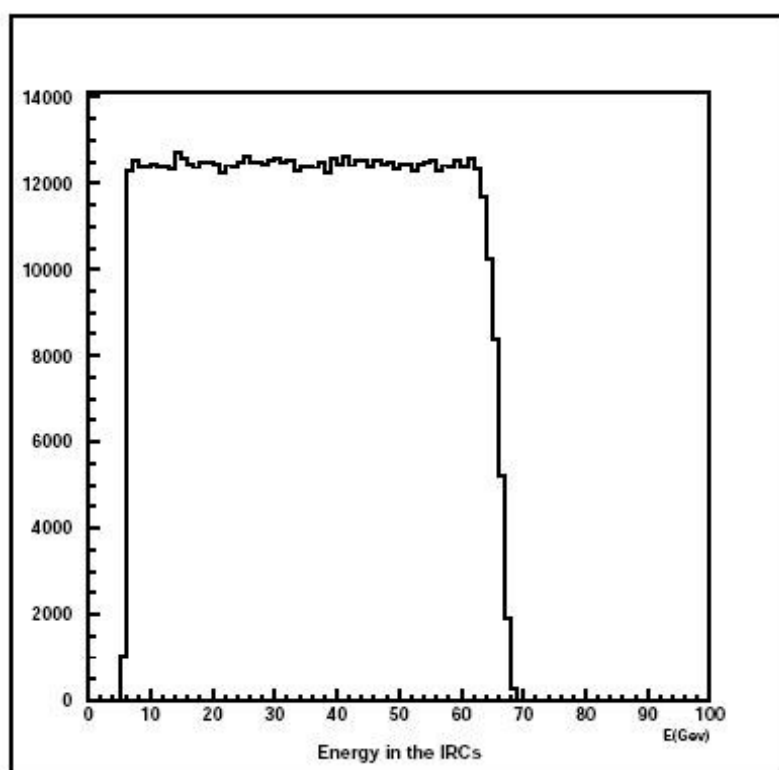


Figura 2.12: distribuzione di energia nel calorimetro IRC

Il calorimetro IRC-2 circonda il tubo del fascio, nella zona compresa fra il contatore RICH ed il calorimetro LKR.

E' previsto che i calorimetri SAC, IRC-1 ed IRC-2 vengano costruiti mediante la stessa tecnologia; le possibilità fra cui scegliere sono essenzialmente due, ovvero il calorimetro a campionamento Shashlyk oppure il calorimetro omogeneo $PbWO_4$ come descritto in modo approfondito nel seguito.

2.11.1.1 Calorimetro a campionamento Shashlyk

Il calorimetro a campionamento con tecnica Shashlyk consiste di una struttura formata da un gran numero di fogli di piombo (Pb) montati insieme, in modo alternato, a un uguale numero di fogli in materiale scintillante (Sci).

I fogli di piombo hanno lo spessore di 1mm mentre i fogli di materiale scintillante hanno lo spessore di 2mm. La lunghezza totale della struttura è pari a circa $17X_0$.

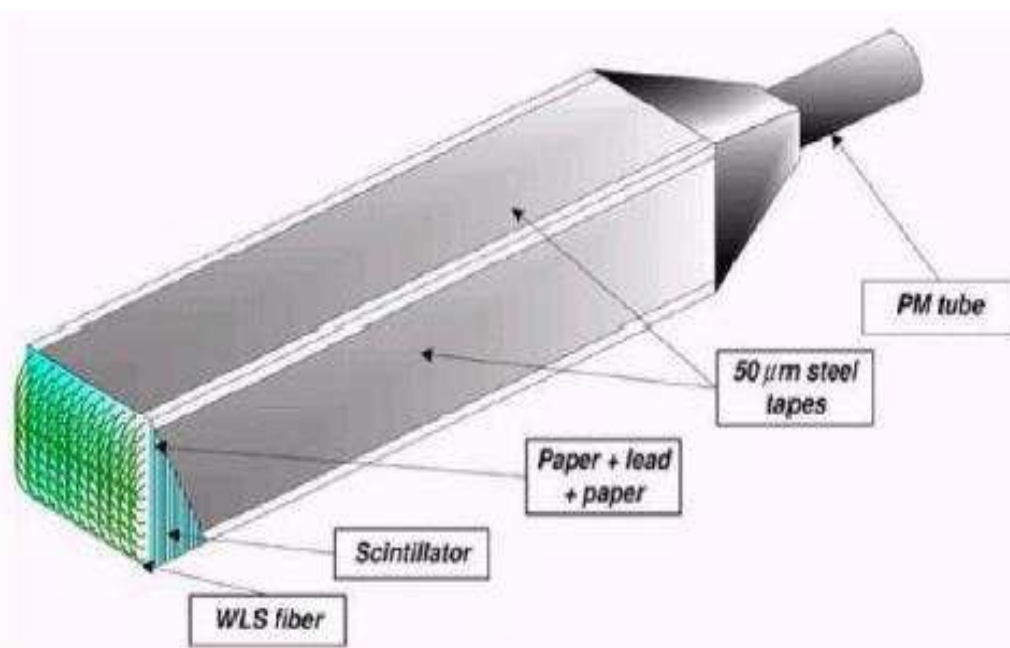


Figura 2.13: schema del calorimetro a campionamento Shashlyk

Quando i fotoni attraversano la struttura, i fogli in materiale scintillante rilasciano una luce di scintillazione; tale luce viene raccolta per mezzo di apposite fibre WLS (Wave Length Shifter). Le fibre si occupano di fare

giungere la luce ad un apposito tubo fotomoltiplicatore PMT per la sua conversione, amplificazione e lettura.

I calorimetri IRC1 ed IRC2 si costruiscono mediante dei settori aventi la forma di corone circolari: il loro diametro interno varrà 14cm mentre il loro diametro esterno sarà di 24cm.

Il calorimetro SAC verrà invece costruito secondo una geometria piana. In ambedue i tipi di montaggio i ripiani saranno montati in modo leggermente sfalsato onde evitare dei cracks.

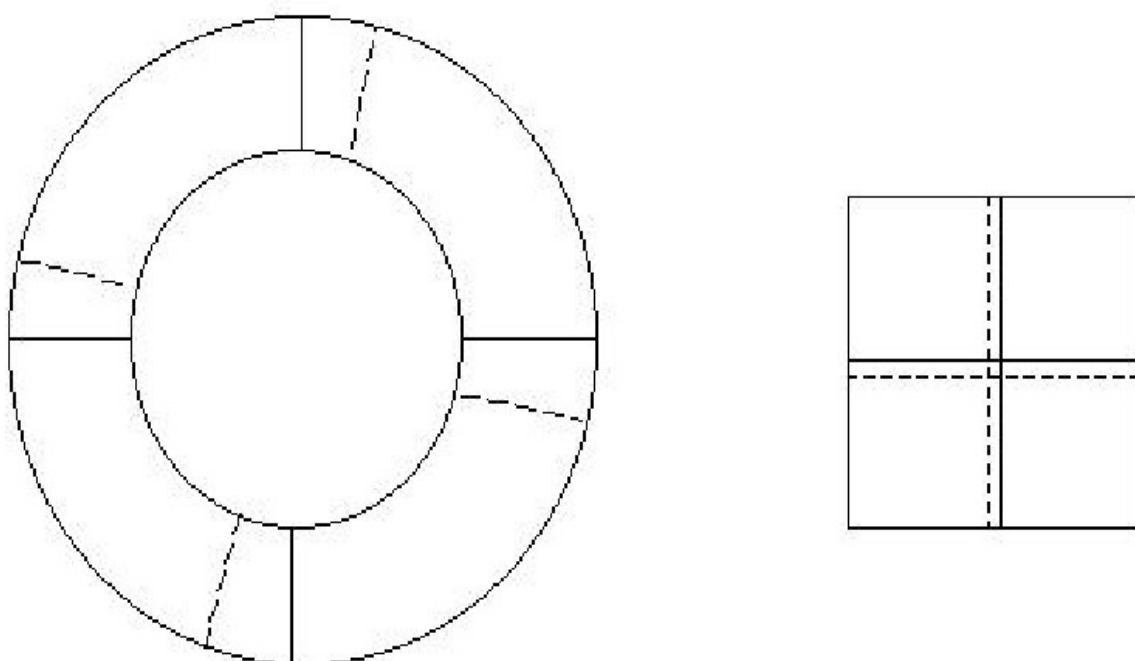


Figura 2.14: realizzazione dei calorimetri IRC e SAC mediante la tecnica Shashlyk; la figura di sinistra rappresenta la sezione del calorimetro IRC (avente la forma di corona circolare) mentre la figura di destra rappresenta la sezione del calorimetro SAC (avente forma quadrata). In entrambi i casi si notano in tratteggio i montaggi lievemente sfalsati.

2.11.1.2 Calorimetro omogeneo PbWO_4

Il calorimetro omogeneo con struttura PbWO_4 prevede la realizzazione dei calorimetri IRC1 ed IRC2 mediante tre anelli longitudinalmente adiacenti. Il loro raggio interno dovrà valere 7cm mentre il loro raggio esterno dovrà valere 12cm. Ciascun anello sarà costruito con un insieme di sedici cristalli di PbWO_4 aventi forma trapezoidale.

Quando i fotoni attraversano i cristalli, si generano dei segnali che devono essere letti mediante l'ausilio di piccoli fotodiodi APDs (Avalanche Photo Diodes) sulla faccia interna oppure sfruttando dei piccoli fotomoltiplicatori PMTs (Photo Multiplier Tubes) sulla faccia esterna.

Nel caso di utilizzo dei fotodiodi a valanga APDs bisogna porre attenzione alla possibilità che essi vadano ad occupare lo spazio in cui passa il fascio di particelle.

Analogamente, nel caso di utilizzo dei fotomoltiplicatori PMTs, bisogna prendere in considerazione la possibilità che essi ostruiscano la zona di fronte al contatore RICH relativamente ai piccoli angoli.

Al fine di risolvere le suddette problematiche, bisogna impostare la lettura dei segnali sulla faccia opposta a quella da cui provengono le particelle del fascio. Quindi si dovrebbe utilizzare, nel caso dei calorimetri IRC1 ed IRC2, un anello singolo anziché i tre previsti inizialmente; tale anello utilizzerebbe dei cristalli di forma appositamente studiata al fine di evitare dei possibili cracks.

Invece, nel caso del calorimetro SAC, si dovrebbero utilizzare dei cristalli a forma di prisma; è previsto che essi siano disposti come una matrice del tipo 8 x 8, sfasati di un certo angolo rispetto alla direzione del fascio onde evitare dei possibili cracks.

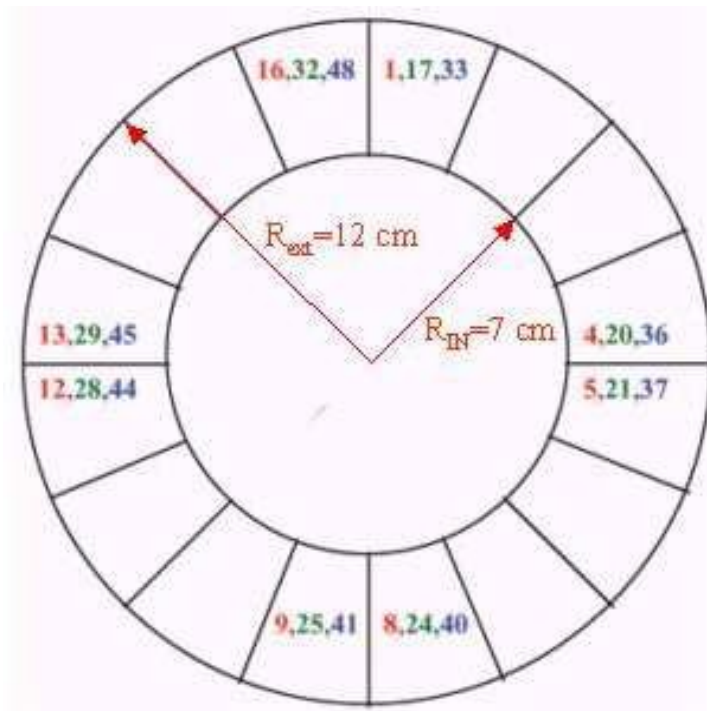


Figura 2.15: realizzazione del calorimetro IRC mediante la tecnica $PbWO_4$; la figura rappresenta la sezione del calorimetro IRC (avente la forma di corona circolare). Si può notare la suddivisione della sezione in sedici settori.

Dal punto di vista meccanico il calorimetro IRC1, del peso di 40Kg, viene sostenuto per mezzo di un tubo leggero in fibra di carbonio connesso ad una flangia del tubo in cui passa il fascio di particelle.

Il calorimetro IRC2, del peso di 40Kg, sarà invece montato su una sezione saldata al tubo del fascio. Si sta studiando anche la possibilità di utilizzare dei cavi sottili di sostegno, che passano attraverso la zona occupata dal contatore RICH e dal calorimetro LKR.

Il calorimetro SAC, del peso di 55Kg, potrebbe essere inserito all'interno di una scatola chiusa, da appendere in zona appropriata, all'interno della camera a vuoto.

2.11.2 LKR (Liquid KRipton calorimeter)

Il calorimetro LKR (Liquid KRipton calorimeter) consente di ottenere il veto dei fotoni emessi ad angoli intermedi ($1\text{mrad} < \varphi < 8.5\text{mrad}$). Il calorimetro LKR è progettato per imporre il veto dei fotoni con energie comprese nell'intervallo $(1\div 67)\text{GeV}$.

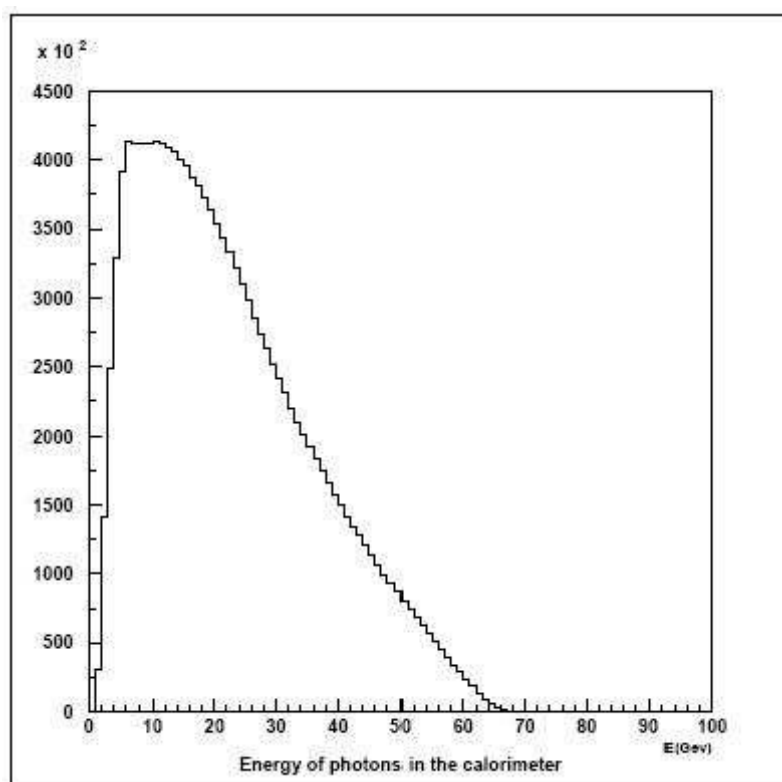


Figura 2.16: distribuzione di energia nel calorimetro LKR.

E' stato possibile riutilizzare il calorimetro a kripton liquido già usato nei precedenti esperimenti NA48/1 ed NA48/2. In questo calorimetro viene utilizzato il kripton (Kr) liquido come mezzo attivo; si riescono ad ottenere

delle prestazioni molto buone soprattutto per quanto riguarda la misura dell'energia sia degli elettroni e^- che dei positroni e^+ , derivanti dai seguenti decadimenti a tre corpi: $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \nu$; $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$. In questo modo si riesce ad ottenere una elevata reiezione del fondo dovuto a questi indesiderati decadimenti.

Il calorimetro LKR ha una sezione trasversale di forma ottagonale, nel cui centro è presente una apposita apertura di raggio 8cm che consente il passaggio del fascio di particelle non decadute. La lunghezza del calorimetro è di circa 127cm, equivalenti all'incirca a $27X_0$.

Internamente il calorimetro risulta formato da celle quadrate di lato 2cm, adibite alla raccolta della ionizzazione prodotta.

Il rilevamento di una carica elettrica è possibile in quanto le celle sono collegate ad un anodo di elevata tensione e a due catodi posti al potenziale di terra. Se si riesce ad ottenere una precisione molto buona riguardo ai potenziali di riferimento, allora diviene possibile misurare la carica in modo accurato.

2.11.3 LAV (Large Angle Vetoes)

Si utilizza una dozzina di contatori ANTI, detti anche LAV (Large Angle Vetoes), i quali vengono piazzati ad intervalli opportuni lungo la camera di decadimento a vuoto, onde ottenere il veto principalmente dei fotoni e di altre particelle, emessi con un elevato angolo ($8.5\text{mrad} < \varphi < 50\text{mrad}$). Per la realizzazione dei contatori ANTI sono state passate al vaglio diverse possibili soluzioni tecnologiche: in particolare sono state prese inizialmente in considerazione sia la tecnologia à la CKM che la tecnologia

à la KLOE, le quali vengono discusse dettagliatamente nell'appendice della presente tesi.

In seguito si è però deciso che i contatori ANTI venissero costruiti mediante la tecnologia ai vetri di piombo, di cui si discute dettagliatamente anche nel successivo paragrafo.

I contatori ANTI sono progettati per rivelare i fotoni con energie comprese nell'intervallo $(0 \div 22.5)$ GeV.

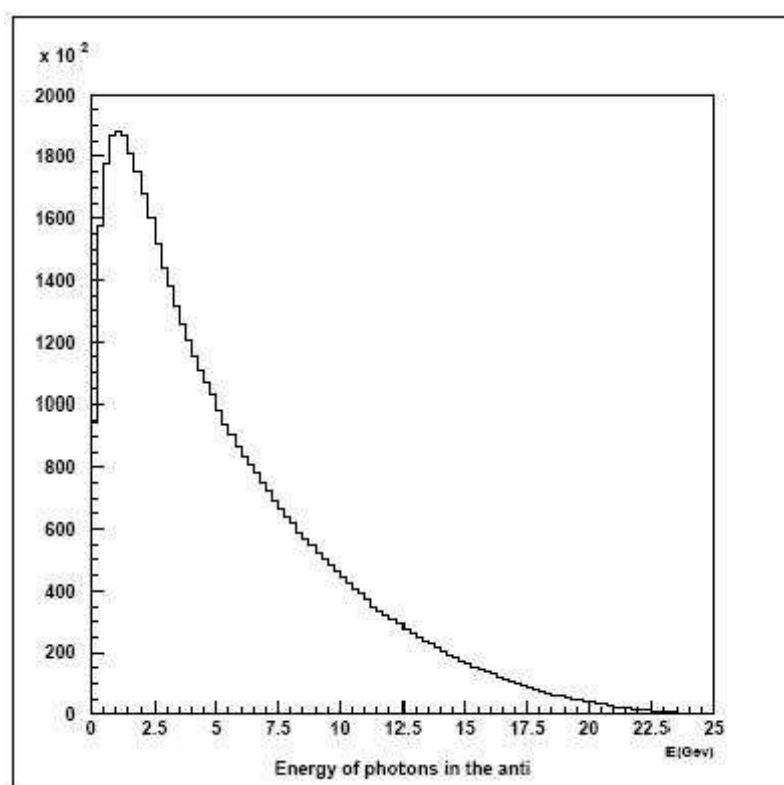


Figura 2.17: distribuzione di energia nei contatori LAV.

Le motivazioni che hanno condotto alla scelta dei vetri al piombo sono essenzialmente le seguenti: innanzitutto si è tenuto conto delle più elevate prestazioni come anticoincidenza dei vetri al piombo ed inoltre si è tenuto

in considerazione il fatto che il loro costo sarebbe stato inferiore, visto che era possibile riciclare quelli già utilizzati nell'esperimento OPAL.

L'alta densità e lo spessore dei vetri al piombo rivela particolarmente bene i raggi γ , producendo delle emissioni Cherenkov dagli elettroni prodotti dai γ . Inoltre, per lo stesso effetto, rivela anche quasi tutte le particelle cariche alle energie a cui si lavora nel presente esperimento.

Anche i neutroni interagiscono per scambio carica, producendo secondari che sono visibili per effetto Cherenkov. Il vantaggio del vetro al piombo è che tutto il volume è sensibile, mentre nelle altre soluzioni c'erano delle zone morte di assorbimento non visibile. Infine bisogna notare che il diametro interno dei contatori ANTI vale 100mm mentre il loro diametro esterno vale 300mm.

2.11.3.1 Moduli con vetri al piombo

Come si è visto, si prevede di realizzare i contatori ANTI secondo una tecnologia [8] che ricalca quella del calorimetro già utilizzato precedentemente nell'esperimento OPAL.

Il materiale con cui vengono costruiti tali contatori è vetro di piombo del tipo SF57.

In questa tecnica ciascun modulo è essenzialmente costituito da blocchi di altezza 37cm, a forma di piramide troncata, con una base quadrata il cui lato vale 11cm.

Alla base di ciascun blocco viene collocata una guida di luce della lunghezza di 4cm, il cui scopo è quello di consentire l'accoppiamento ottico fra il blocco ed un tubo fotomoltiplicatore Hamamatsu R2238.

Infatti, anche in questo caso, la lettura dei segnali avviene avvalendosi dell'uso di tubi fotomoltiplicatori.

Alla base dei blocchi viene piazzata una suola di acciaio fornita di appositi buchi per il fissaggio meccanico dei blocchi stessi; in tal modo si possono ottenere dei moduli, ovvero strutture formate da molti blocchi in serie (tipicamente ci si avvale di alcune decine di blocchi).

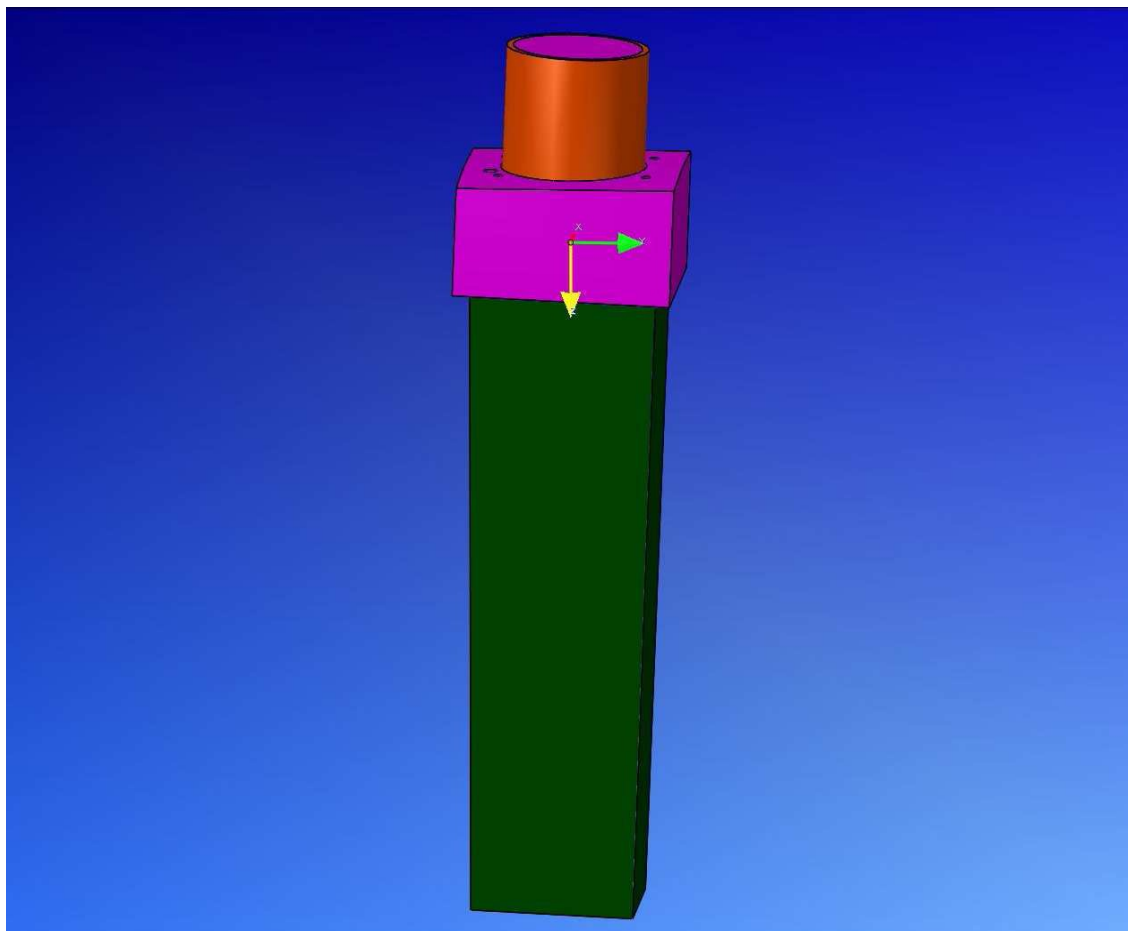


Figura 2.18: struttura di un contatore OPAL a vetro di piombo

I blocchi vengono montati in modo tale che i tubi fotomoltiplicatori sporgano al di fuori dei buchi. I moduli con vetri al piombo vengono

organizzati secondo una forma ad anello, il cui raggio interno vale 53cm; il contatore viene infine ottenuto dall'unione di cinque anelli, ciascuno dei quali risulta formato da 32 blocchi a vetro di piombo.

Infine si adotta l'accorgimento pratico di ruotare lievemente ciascun anello rispetto a quello precedente e a quello successivo, al fine di garantire la totale ermeticità del contatore.

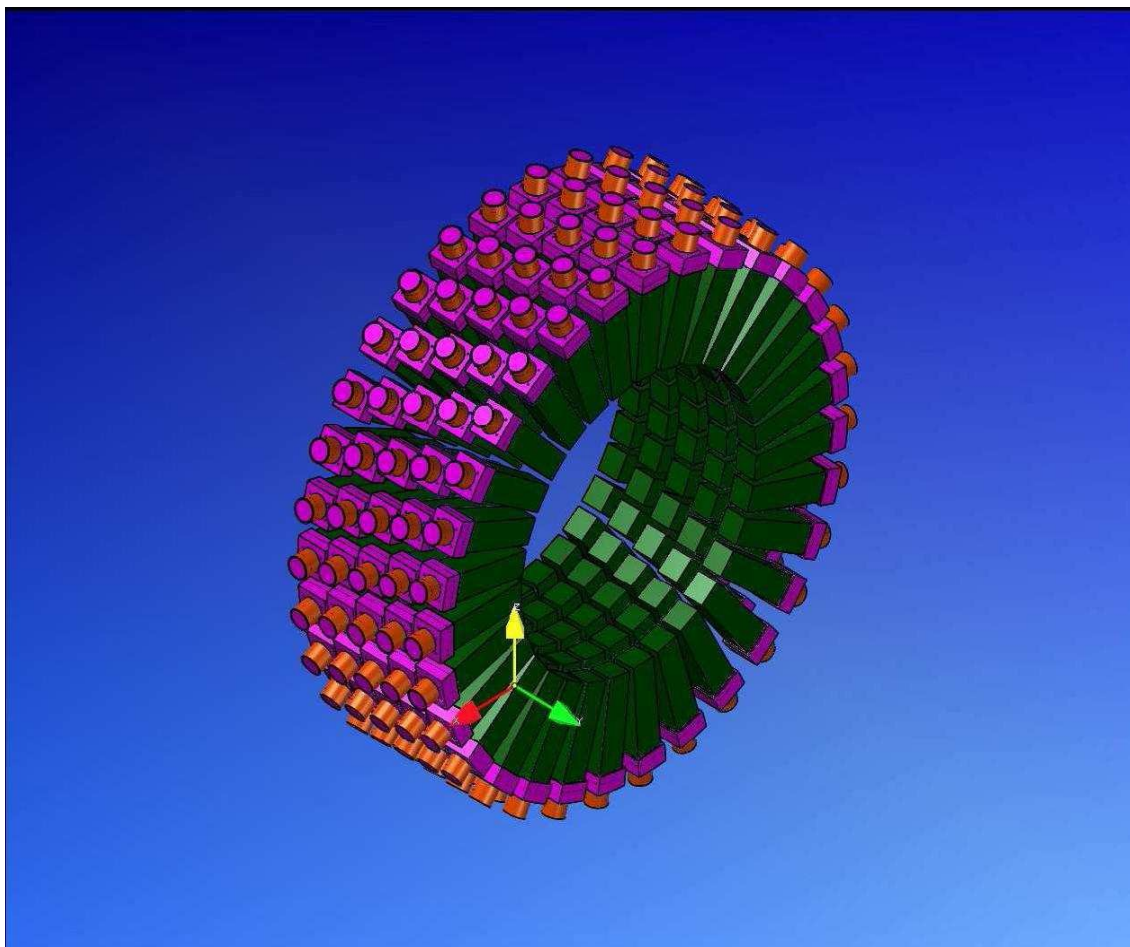


Figura 2.19: realizzazione dei contatori LAV mediante la tecnica del calorimetro OPAL; vengono utilizzati cinque anelli, ognuno dei quali risulta costituito da trentadue blocchi con vetro di piombo. Ciascun anello è lievemente sfasato rispetto a quelli ad esso adiacenti, al fine di garantire la completa ermeticità del contatore.

Si è scelto un angolo di sfasamento fra anelli adiacenti pari ad un quinto dell'angolo fra due blocchi consecutivi in uno stesso anello.

Infine viene installato un supporto meccanico addizionale sulla suola di acciaio, al fine di realizzare un ancoraggio più saldo della base dei blocchi. Mediante l'ausilio di tale supporto meccanico si è inoltre in grado di migliorare la resistenza dei moduli con vetri al piombo, tramite un incollaggio addizionale sui suoi lati.

2.12 STRAW TRACKER

E' necessario predisporre un apparato che sia in grado di minimizzare i fenomeni di diffusione multipla dei pioni π^+ ; a tal fine si è predisposto uno spettrometro magnetico, costituito da quattro stazioni di rivelatori a straw, posizionato nella regione di decadimento all'interno della camera a vuoto. Lo spettrometro è formato da una serie di straw tubes ed il suo progetto non contempla l'utilizzo di alcun telaio interno o eventuali flange: questa scelta è importante in quanto così facendo si evitano fondi aggiuntivi che si potrebbero generare a causa dell'interazione della struttura con le particelle (facenti parte dell'alone del fascio) che la attraversano.

Il progetto dello Straw Tracker deriva essenzialmente dall'esperienza precedentemente maturata con degli straw trackers simili utilizzati in altri esperimenti già effettuati precedentemente al CERN come COMPASS ed ATLAS.

Lo Straw Tracker è formato da una serie di straw planes, i quali sono fissati ad un telaio di alluminio avente forma ottagonale e chiamato straw chamber.

In tutto vengono utilizzate quattro straw chambers (ST-CH 1, 2, 3, 4), posizionate nel vuoto: esse si avvalgono di quattro strati di straw tubes di lunghezza pari a 2.1m e distanziati fra loro da uno spazio di 120mm.

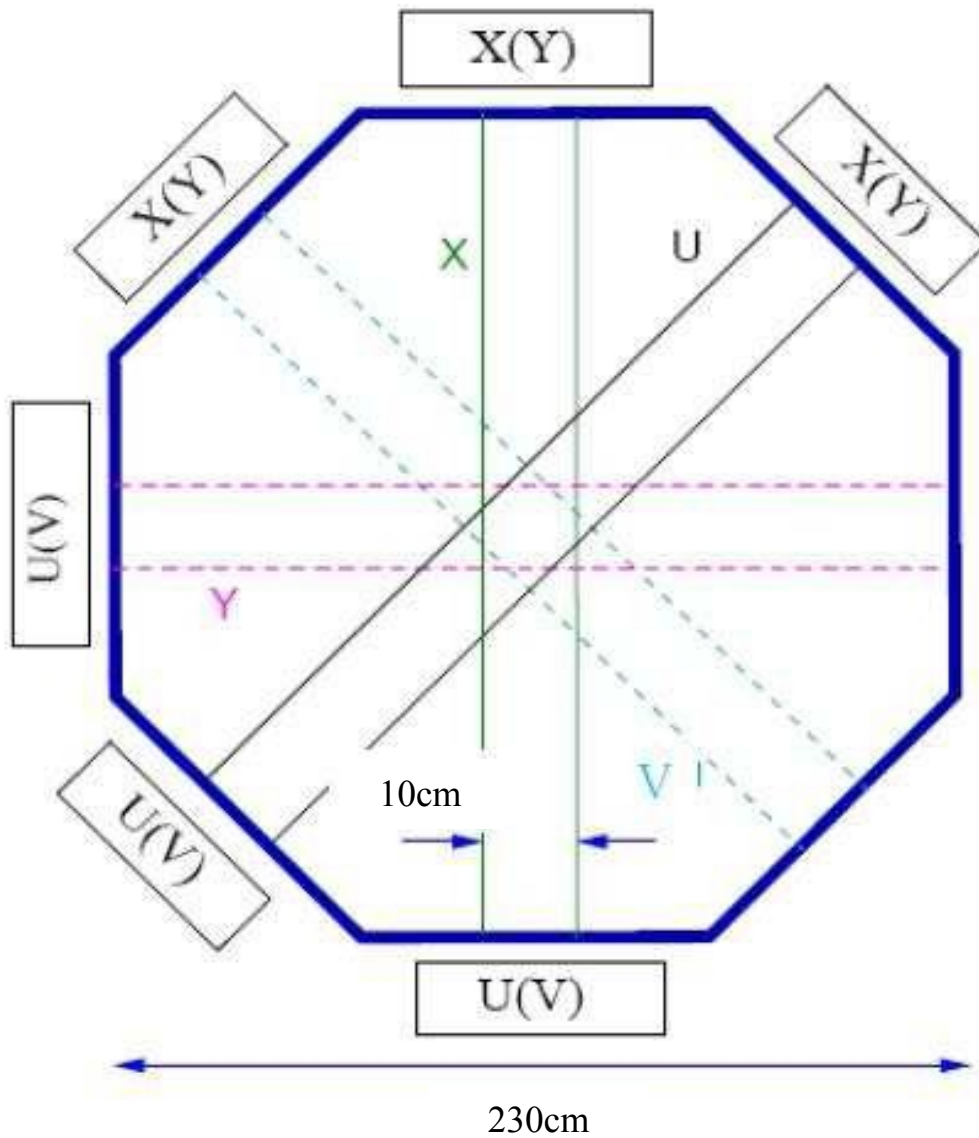


Figura 2.20: schema di una straw chamber.

Con l'uso di quattro straw chambers si riesce ad effettuare il tracciamento secondo le direzioni di quattro assi x , y , u , v sfasati fra loro di 135° .

Dalla figura alla pagina precedente si può notare una zona centrale di larghezza 10cm, la quale corrisponde al passaggio del fascio di particelle deviato secondo le direzioni di tracciamento adottate (x,y) e (u,v).

Infatti la straw chamber deve effettuare la misura di due coppie di coordinate ortogonali se si vuole eliminare l'ambiguità sinistra-destra nell'assegnazione delle tracce.

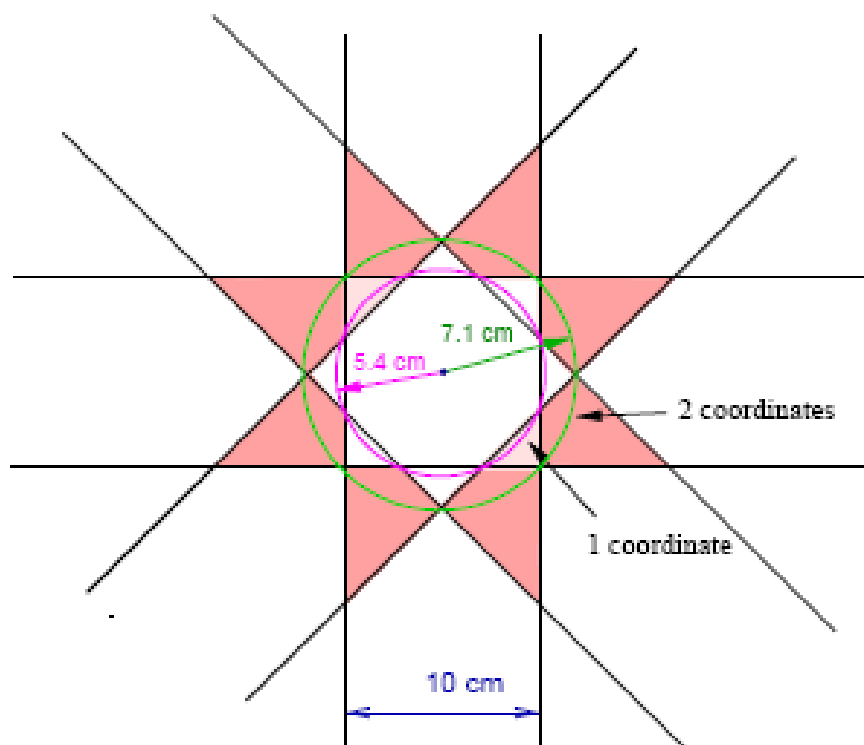


Figura 2.21: parte centrale di una straw chamber.

Ogni straw tube è ricavato mediante l'unione di due strati sottili di kapton, aventi spessore di $12\mu\text{m}$ per il lato esterno e $25\mu\text{m}$ per quello interno, rispettivamente; in tal modo si riesce ad ottenere la necessaria rigidità. Lo Straw Tracker è formato da semipiani di straw tubes: un semipiano

contiene 112 straw tubes di diametro 9.6mm e 16 straw tubes di diametro 4.8mm, separati fra loro da uno spazio vuoto di 10cm. Ciascuna straw chamber misura quattro coordinate e consiste di 2048 canali in totale. Infine bisogna notare che allo stato attuale si è scelto di utilizzare un gas ottenuto dal miscuglio di CO₂ (80%), isobutano C₄H₁₀ (10%), CF₄ (10%). A tal proposito si è fatto in modo che gli straw tubes siano ben separati gli uni dagli altri (120mm); ciò è particolarmente importante, in quanto il loro diametro potrebbe subire delle variazioni corrispondentemente alla differenza di pressione fra l'interno e l'esterno del tubo stesso.

2.13 RICH (Ring Imaging CHerenkov counter)

Sappiamo che fra tutti i possibili modi di decadimento del mesone K⁺, quello che avviene il maggior numero di volte è il modo $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$; infatti il branching ratio ad esso associato è del 63%.

La conseguenza immediata di questo fatto è che moltissimi muoni finiscono col contaminare la regione di segnale; è quindi particolarmente importante evitare di scambiare un muone μ^+ per un pione π^+ .

A tale scopo viene utilizzato un contatore RICH (Ring Imaging CHerenkov counter), il quale effettua una operazione di Particle IDentification occupandosi quindi di separare muoni e pioni sia positivi che negativi (separazione π/μ). Tale separazione avviene per le particelle aventi valori della quantità di moto compresa fra un minimo di 15GeV/c ed un massimo di 35GeV/c.

Il RICH effettua anche la misura del tempo di arrivo dei pioni π^+ sul rivelatore stesso: la misura è soggetta ad una risoluzione temporale di

100ps. Il RICH viene posizionato nello spazio compreso fra la quarta straw chamber ed il calorimetro LKR. Il RICH ha una lunghezza di 18.0m ed un diametro esterno di 2.8m; esso viene riempito con gas neon (Ne) alla pressione atmosferica, corrispondente al 5.6% della lunghezza di radiazione.

Il tubo è partizionato in tre segmenti aventi circa la stessa lunghezza: muovendosi secondo la stessa direzione del fascio, il diametro del primo segmento vale 20mm, il diametro del secondo segmento vale 22mm e per finire il diametro del terzo segmento vale 24mm. Inoltre il tubo è inclinato di un lieve angolo (2.5mrad) rispetto all'asse del telaio del contatore, in modo da adattarsi alla traiettoria del fascio di particelle.

Il funzionamento del RICH si basa sull'effetto Cherenkov. Analogamente a quanto spiegato nel CEDAR, conoscendo il momento e la direzione dei muoni e dei pioni (effettuata con lo Straw Tracker), scegliendo un gas opportuno, questi generano anelli di luce Cherenkov tali per cui si possono discriminare i muoni, i quali hanno un'apertura angolare superiore rispetto ai pioni con lo stesso impulso. La luce così generata viene riflessa tramite due gruppi di specchi aventi uno spessore di 2.5cm ed una lunghezza focale di 17m.

Gli specchi fanno giungere la luce Cherenkov su due regioni focali distinte, le quali si trovano a circa 1m di distanza dall'asse del tubo e risultano equipaggiate con appositi rivelatori di fotoni per la lettura dei segnali: ciascuna regione focale è provvista di circa 1000 tubi fotomoltiplicatori PMT Hamamatsu R7400-U03, aventi dei pixel di dimensione 18mm, con una superficie attiva di lato 8mm. La luce viene infine convogliata su una apposita guida concentratrice di luce del tipo Winston.

Gli specchi devono coprire un'area piuttosto estesa, del diametro di circa 2.8m, per cui si deve ricorrere ad un mosaico di specchi più piccoli di dimensione 1m.

Si rendono necessari dieci specchi, di cui quattro aventi forma esagonale e sei aventi forma semiesagonale: è necessario prevedere un semi buco su due degli specchi di forma esagonale, onde consentire il collocamento del tubo del fascio attraverso gli specchi stessi.

Una possibile alternativa prevede l'utilizzo di quattro specchi ottagonali di diametro 1m, piazzati attorno al tubo del fascio, a cui si aggiungono quattro specchi quadrati di dimensione inferiore ed adibiti alla copertura della rimanente area attorno al tubo.

In entrambe le soluzioni è previsto che metà degli specchi puntino verso la regione superiore dei tubi fotomoltiplicatori PMT mentre l'altra metà degli specchi puntino verso la regione inferiore dei PMT, al fine di evitare una possibile ombra dovuta al tubo del fascio.

2.14 MUV (MUon Veto system)

Il modo di decadimento $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ genera un fondo rilevante: infatti l'elevato numero di muoni μ^+ così generati contaminano il segnale. Inoltre bisogna tener presente che vi sono anche altri possibili modi di decadimento del mesone K^+ che generano muoni; dunque si rende necessario l'utilizzo di un opportuno sistema di veto per muoni. In addizione alla soppressione dei muoni, già svolta per via cinematica dai GigaTracker, dal magnete MNP33, dallo Straw Tracker e dal contatore RICH, è stato deciso di ricorrere ad un apparato denominato MUV (MUon

Veto system), il quale garantirà una ulteriore soppressione dell'ordine di 10^{-5} dei muoni rispetto ai pioni.

Il MUV è composto da tre parti distinte, chiamate MUV1, MUV2, MUV3 e disposte in posizioni contigue lungo l'asse longitudinale del fascio.

In via preliminare, per la rivelazione dei muoni ci si avvale del calorimetro LKR: infatti se un pione passa attraverso la zona riempita con kripton liquido, ha un'alta probabilità di dare origine ad uno sciame adronico; ciò non succede invece nel caso di un muone.

Dopodiché seguono i moduli MUV1 e MUV2, posizionati uno di seguito all'altro: si tratta di calorimetri adronici, che misurano le energie depositate dalle particelle incidenti ed inoltre ne rilevano lo sciame prodotto. Entrambi i moduli sono dei calorimetri con una struttura a sandwich, ricavata dall'interposizione di strati di ferro e di materiale scintillatore. Nel caso del MUV1 si utilizzano 24 strati di materiale scintillatore mentre nel caso del MUV2 se ne utilizzano 22.

Questa struttura a sandwich consente di raggiungere la rivelazione al livello richiesto: infatti i pioni interagiscono con la struttura dei calorimetri, dando spesso origine a degli sciame adronici, mentre ciò non accade nel caso dei muoni, che solitamente attraversano gli strati senza interagire con essi. Inoltre è necessario sopprimere i decadimenti dei muoni che danno origine a bremsstrahlung o produzione di coppie e che quindi depositano una quota maggiore della loro energia nei calorimetri. Si tratta di eventi rari, ma che comunque devono essere ben discriminati da eventi simili dovuti ai pioni; per lo studio dei suddetti decadimenti si richiede una opportuna segmentazione dei calorimetri in strati successivi.

Per la raccolta della luce originatasi dal modulo MUV1 si prevede di utilizzare delle apposite fibre WLS (Wave Length Shifting); invece nel caso del modulo MUV2 si pensa di ricorrere all'uso di guide di luce, le

quali convogliano la luce di scintillazione direttamente in ingresso a dei tubi fotomoltiplicatori PMT.

Il calorimetro MUV1 è costituito da 25 strati in acciaio SE37; i 23 strati interni hanno le dimensioni di 2600mm x 2600mm e spessore di 25mm mentre il primo e l'ultimo strato hanno le dimensioni di 3200mm x 3200mm e spessore di 25mm. La scelta di utilizzare un primo ed ultimo strato più larghi deriva dalla necessità di fornire un supporto per la struttura stessa, le fibre WLS, i fotorivelatori e i canali di read out. La distanza fra strati di ferro consecutivi è pari a 12mm e l'intera struttura è mantenuta insieme grazie all'utilizzo di barre in acciaio del diametro di 4cm, posizionate in corrispondenza degli angoli del modulo. In tal modo non è necessario ricorrere a delle eventuali saldature, visto che il MUV1 può essere costruito mediante un semplice accatastamento degli strati di ferro, intervallati da strati di materiale scintillatore.

Tutti gli strati hanno un buco centrale del diametro di 25cm per consentire il passaggio del fascio di mesoni K^+ originali. Al fine di garantire maggiore stabilità meccanica in caso di spostamenti del modulo MUV1, un tubo di acciaio dello stesso diametro può essere inserito e fissato all'interno del buco centrale.

Per quanto riguarda il calorimetro MUV2, esso è essenzialmente il modulo frontale, ma ruotato di 180° , del calorimetro adronico HAC precedentemente utilizzato nell'esperimento NA48.

Dopo i moduli MUV1 e MUV2, si mette una parete di ferro dello spessore di 80cm, in modo tale che i pioni sciamino e vengano completamente assorbiti; invece i muoni proseguono senza quasi interagire con questa parete.

Infine viene utilizzato il modulo MUV3, anche noto come Fast Muon Veto: quest'ultimo è un detector per il veto di muoni, necessario per

garantire la soppressione di eventi muonici già al primo livello di trigger, con un fattore di almeno 10. E' il caso di denotare che, in considerazione della distanza fra strati di scintillatori contigui, la risoluzione temporale vale all'incirca 1ns.

Capitolo 3

Il GigaTracker e il problema dello smaltimento del calore

3.1 Motivazioni che rendono necessario l'uso del GigaTracker

L'esperimento NA62 vuole studiare il decadimento raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ al CERN SPS (Super Proton Synchrotron); per questa ragione viene utilizzato un fascio di mesoni K^+ di elevata energia ed elevata intensità. Il fascio di particelle viaggia attraverso una apposita linea di fascio, chiamata K12, per poi giungere fino alla regione di decadimento ed al successivo apparato sperimentale.

Allo scopo di misurare la quantità di moto e la direzione delle particelle del fascio vengono utilizzate tre stazioni di rilevamento ad alta precisione [9], denominate GigaTracker (GTK). Esse vengono posizionate all'interno di un tubo a vuoto, in una zona antistante l'ingresso della regione di decadimento.

Ciascuna delle suddette stazioni è essenzialmente un rivelatore formato da una matrice a pixel di silicio (silicon pixel detector): la matrice di ciascuna stazione viene poi collegata a 2 x 5 chip in silicio (Si), per la lettura dei segnali generati ed il loro invio ad una elettronica esterna, per la successiva elaborazione.

3.2 Misure effettuate dalle stazioni GigaTracker

Le tre stazioni GigaTracker vengono collocate in modo da intercettare il fascio di particelle in tre distinte posizioni, in una zona antecedente l'inizio della camera a vuoto.

Il fascio di particelle attraversa innanzitutto la stazione GTK1 per poi proseguire verso una zona in cui sono posizionati quattro magneti dipolari.

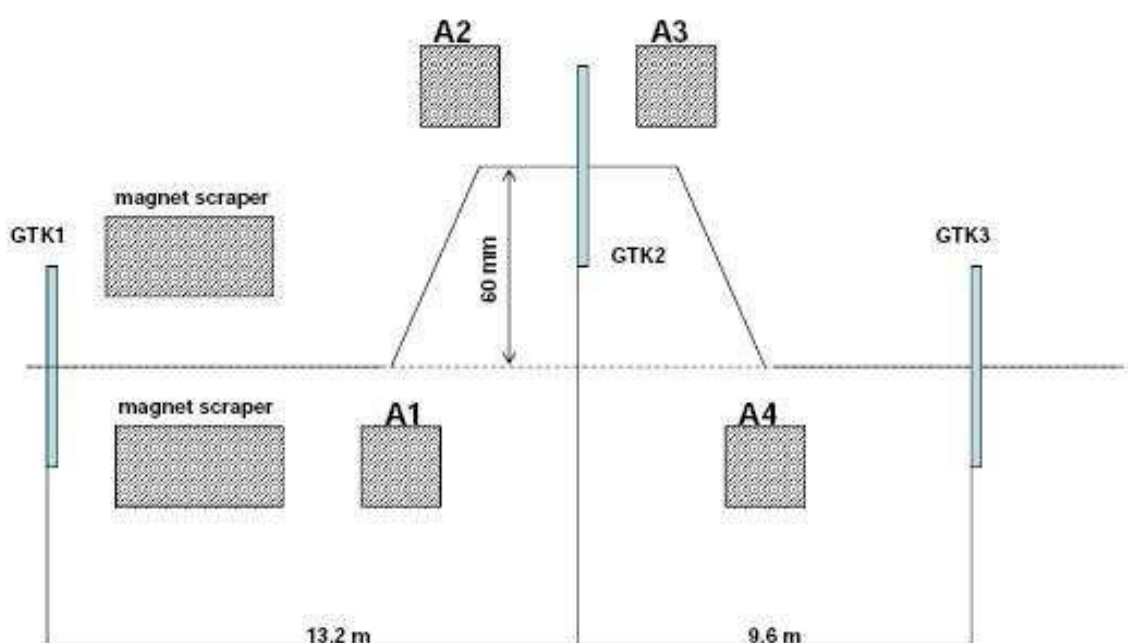


Figura 3.1: posizioni occupate dalle tre stazioni di rilevamento GTK1, GTK2, GTK3 lungo la linea di fascio; la figura illustra anche la deflessione del fascio di particelle sul piano verticale, in corrispondenza della stazione intermedia GTK2.

Dall'osservazione della figura precedente si può notare come, tramite l'utilizzo degli appositi magneti dipolari, sia possibile far deviare

verticalmente il fascio di particelle per una lunghezza totale di 60mm; così facendo si riesce a fare in modo che tale fascio attraversi anche la stazione GTK2.

Alla misurazione della quantità di moto delle particelle del fascio concorrono entrambe le stazioni GTK1 e GTK2; ciò risulta possibile avvalendosi di un campo magnetico noto, generato dagli appositi magneti dipolari posti fra tali stazioni. Inoltre la stazione GTK2 effettua la prima misura della direzione delle particelle.

Dopodichè i successivi magneti dipolari si occupano di riportare nuovamente il fascio sull'asse di partenza, per il successivo attraversamento della stazione GTK3, al fine di ottenere la ulteriore misura della direzione delle particelle.

3.3 Ruolo svolto dalle stazioni GigaTracker nel contesto della reiezione cinematica del fondo

Le stazioni GigaTracker devono misurare la quantità di moto e la direzione dei kaoni K^+ (particelle madri) e dei pioni π^+ (particelle figlie); infatti le uniche particelle rivelabili generatisi dal decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ sono appunto i pioni π^+ , dato che i neutrini ν e gli antineutrini $\bar{\nu}$ non sono rivelabili.

E' importante che le stazioni GigaTracker misurino la quantità di moto P_K dei mesoni K^+ ; le misure così ottenute vanno ad integrarsi con le informazioni fornite dallo spettrometro magnetico Straw Tracker, posizionato all'interno della camera a vuoto e che misura l'impulso dei pioni π^+ .

Si perviene così alla ricostruzione degli eventi; inoltre, riuscendo in tal modo a ricavare i valori delle grandezze P_K , P_π , $\theta_{\pi K}$, si riesce anche a risalire al valore al quadrato della massa mancante m_{miss}^2 . E' dunque possibile garantire la reiezione cinematica del fondo al livello richiesto, per quanto riguarda i decadimenti a due corpi del mesone K^+ oltre che alcuni suoi decadimenti a tre corpi.

3.4 Flusso di particelle atteso sul rivelatore e risoluzioni relative alle misure effettuate

Le stazioni GigaTracker vengono attraversate da un considerevole numero di particelle al secondo [10]; in particolare esse sono interessate dal passaggio del fascio costituito essenzialmente da pioni e con circa il 6% di kaoni.

Il sensore a pixel di silicio viene attraversato dal fascio e viene quindi effettuata la misura di posizione e tempo del passaggio delle particelle, con eccellente risoluzione e senza perturbarne apprezzabilmente il cammino. Infatti le stazioni GigaTracker sono composte da una quantità minima di materiale, posizionata attraverso la linea di fascio ($< 1\% X_0$). I segnali conseguentemente generati vengono mandati a dieci chip di read out per la loro lettura ed invio ad una elettronica esterna per la successiva elaborazione.

E' importante notare come le misure fornite dal GigaTracker siano estremamente precise: in particolare la risoluzione sulla quantità di moto vale $\sigma(P_K)/P_K \sim 0.2\%$, la risoluzione angolare vale $\sigma(\theta_{\pi K}) \sim 14\mu\text{rad}$. Infine la risoluzione temporale relativa ad una singola traccia dovrebbe attestarsi

intorno al valore efficace $\sigma(t) \sim 150\text{ps}$; al momento attuale ci si sta adoperando al fine di garantire il raggiungimento di questo valore e sono in corso degli appositi test su dei prototipi al fine di valutarne meglio le prestazioni.

3.5 Specifiche tecniche delle stazioni GigaTracker

Ciascuna stazione GigaTracker è formata dall'unione di diverse parti in vari materiali [11], per l'espletamento delle sue funzioni: innanzitutto c'è il rivelatore a pixel di silicio (Si) il quale viene collegato, per mezzo di bump bonds in stagno e piombo (Sn-Pb), a dieci chip di read out in silicio (Si). La figura 3.2 alla pagina seguente rappresenta schematicamente il GigaTracker, evidenziandone le sue parti costituenti: con riferimento a tale figura, il volumetto in verde rappresenta il sensore, il quale è una matrice a pixel di silicio; si tratta essenzialmente di un rettangolo avente i lati di 60mm x 27mm, con uno spessore di 200 micron.

Alla base del sensore in silicio sono predisposti dei bump bonds in stagno (nella percentuale del 60%) e piombo (nella percentuale del 40%): essi assicurano il collegamento elettrico fra il sensore stesso ed i chip di read out sottostanti.

Ciascun bump bond è una goccia di stagno-piombo avente il diametro di 25 micron; sono poi presenti dieci chip di read out in silicio (Si), rappresentati in blu nelle figure; essi sono disposti in due righe da cinque chip ciascuna.

I chip occupano complessivamente un volumetto delle dimensioni di 60mm x 37mm, con lo spessore di 100 micron. Ogni chip di read out ha le

dimensioni di 18.5mm x 12mm e spessore di 100 micron; la superficie attiva di ciascun chip ha le dimensioni di 13.5mm x 12mm.

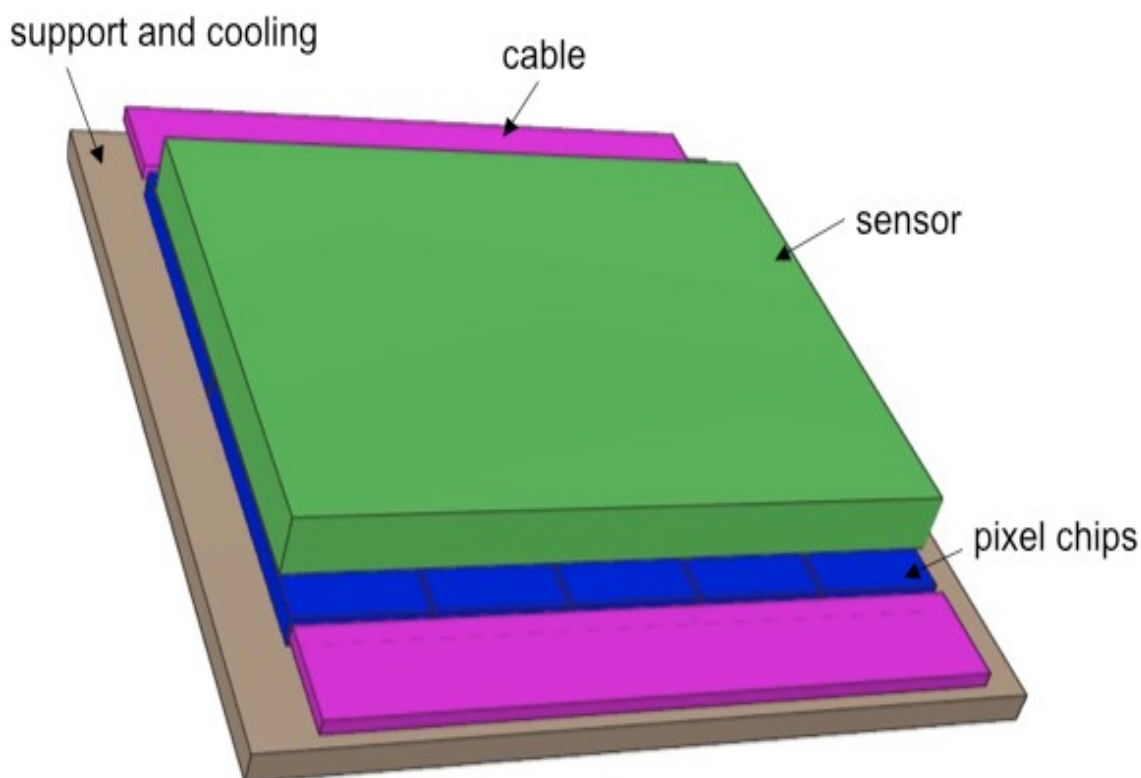


Figura 3.2: struttura del GigaTracker: in figura si notano il sensore (in verde), i chip di read out (in blu), i bus di collegamento interfacciali ai chip tramite wire-bonding (in viola) ed un supporto meccanico di sostegno (in grigio).

Infine bisogna notare che ognuno dei suddetti chip di read out è una matrice di 45 righe x 40 colonne = 1800 pixel; di conseguenza il numero totale di pixel per ciascuna stazione GigaTracker è pari a 18000. Ciascun pixel ha i lati di 300 micron x 300 micron; infine, per coprire lo spazio fra

diversi chip di read out si utilizzano pixel esterni allungati, di dimensioni 300 micron x 400 micron.

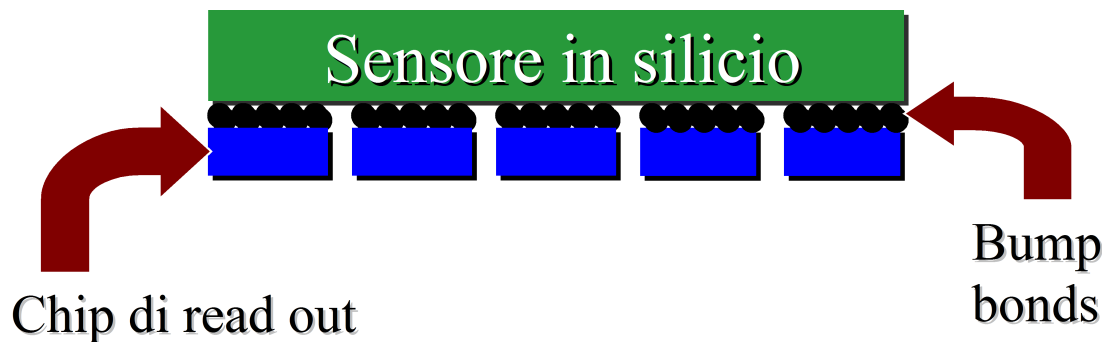


Figura 3.3: vista laterale del GigaTracker: in figura vengono rappresentati il sensore (in verde), i bump bonds (rappresentati con i pallini neri) e i chip di read out (in blu).

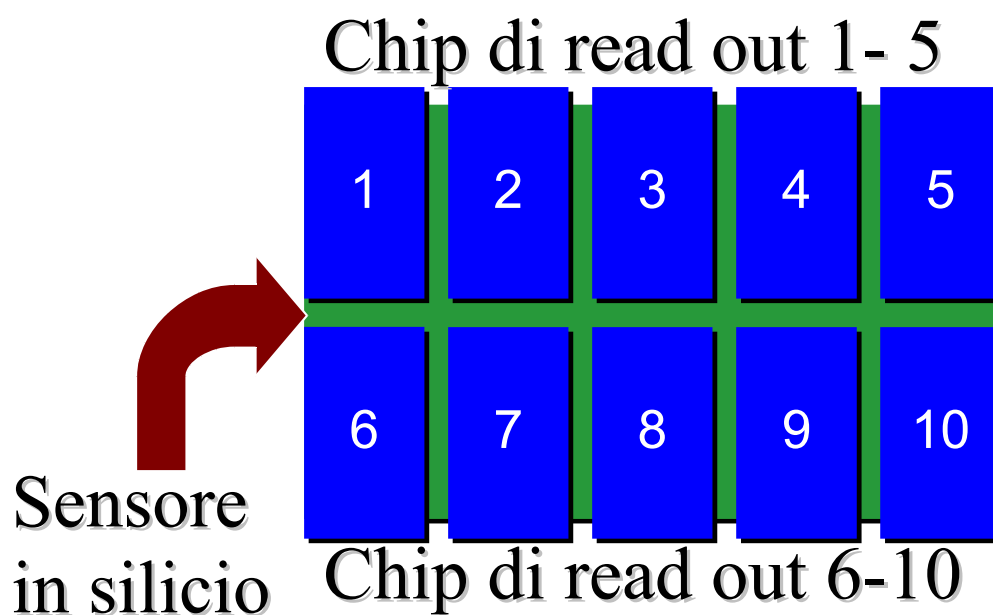


Figura 3.4: vista dal basso del GigaTracker: in figura vengono rappresentati il sensore (in verde) e i chip di read out (in blu).

Per collegare ciascuno dei 18000 pixel al sensore in silicio si utilizzano altrettanti bump bonds; si predispone un bump bond per ogni pixel ed un circuito integrato per ogni pixel.

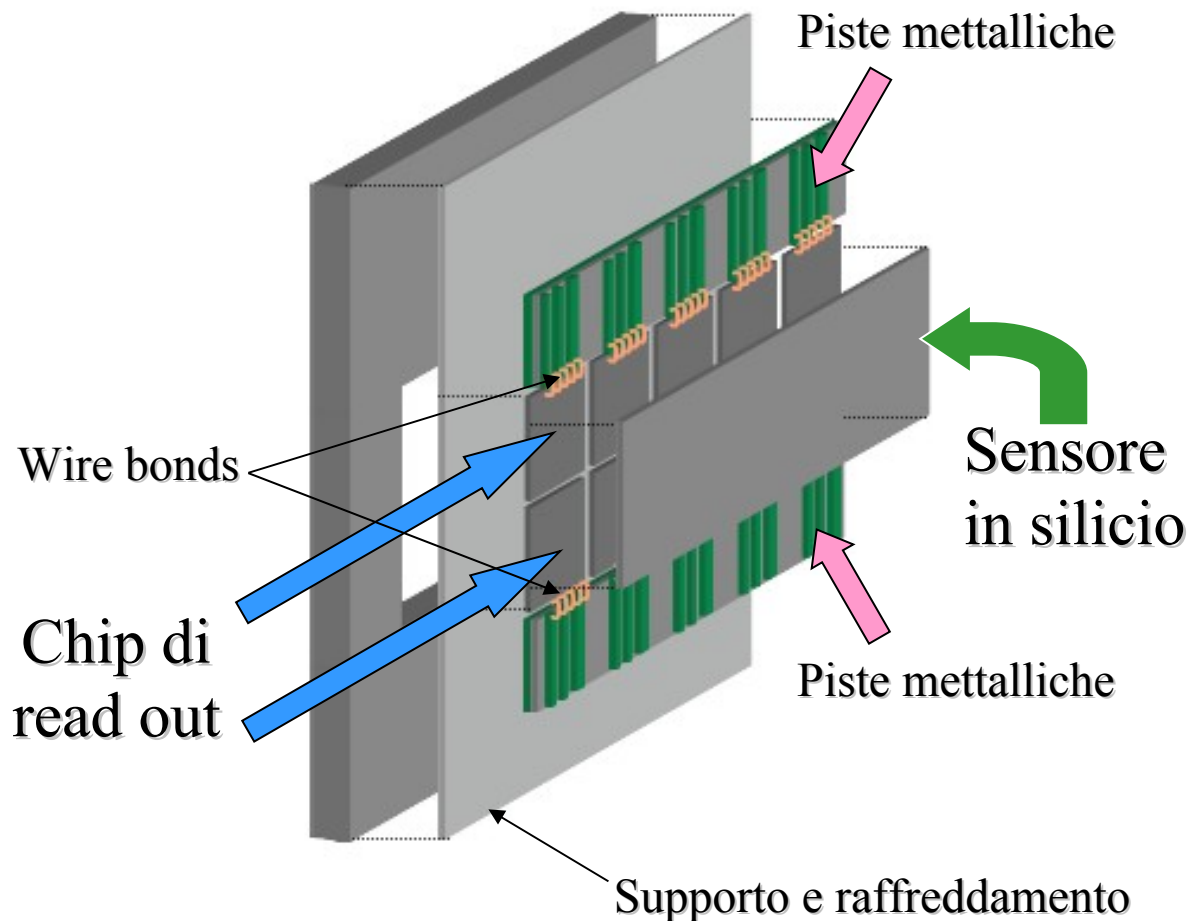


Figura 3.5: configurazione del GigaTracker; sono visibili il sensore in silicio, i dieci chip di read out al di sotto di esso, i wire bonds per il collegamento elettrico dai chip alle piste metalliche laterali ed un supporto meccanico.

Il sensore viene colpito dal fascio e si generano di conseguenza dei segnali che vengono mandati, per mezzo dei bump bonds, ai dieci chip di read out. L'invio dei segnali all'esterno avviene tramite dei wire bonds o piste

metalliche (in oro o rame) dello spessore di 100 micron; le piste metalliche sono collocate lateralmente ai chip di read out.

3.6 Budget di materiale posto attraverso il fascio di particelle

Dai dati tecnici elencati alle pagine precedenti ed in particolare quelli relativi agli spessori delle parti costituenti il GigaTracker, si può constatare come tali spessori siano i più ridotti possibile.

<i>Parte costituente</i>	<i>Spessore espresso in micron</i>	<i>Spessore in termini di X_0</i>
Sensore in silicio	200 μm	$\approx 0.22\% X_0$
Bump bonds in stagno-piombo	25 μm	$\approx 0.01\% X_0$
Chip di read out in silicio	100 μm	$\approx 0.11\% X_0$
Supporto meccanico in fibra di carbonio (valore indicativo)	100 μm	$\approx 0.11\% X_0$

Tabella 3.1: spessori delle diverse parti costituenti del GigaTracker.

Dalla tabella alla precedente si può constatare come lo spessore totale del materiale che deve essere attraversato dal fascio di particelle sia ridotto ad un valore al di sotto di 0.5% X_0 . Infatti si deve garantire che vi sia la minima quantità possibile di materiale attraverso la linea di fascio; di

conseguenza il fascio di particelle non viene perturbato in maniera significativa, nel momento in cui attraversa il rivelatore.

Per quanto riguarda lo spessore della struttura di supporto, la tabella riporta soltanto un valore ragionevole (dell'ordine del centinaio di micron), in quanto la sua scelta definitiva sarà la conseguenza della scelta del tipo di sistema di raffreddamento.

3.7 Esposizione del rivelatore in silicio al fascio di particelle e relativa corrente generata

Il fascio di particelle che attraversa il detector in silicio ha un rate totale di un ordine di grandezza paragonabile al Gigahertz; questo fatto viene anche denotato con la scelta del nome GigaTracker.

Bisogna poi notare che nella parte centrale del detector si concentra il rate massimo di particelle: in particolare nel caso della stazione GTK1 il rate massimo vale circa 1.5MHz/mm^2 , per la stazione GTK2 esso vale circa 1.6MHz/mm^2 mentre per la stazione GTK3 esso vale circa 1.9MHz/mm^2 . Le stazioni GigaTracker consentono la copertura di un'area attiva rettangolare di lati $60\text{mm} \times 27\text{mm} = 1620\text{mm}^2$ (superficie totale S_{TOT}). Tenendo poi presente che il Rate totale effettivo di particelle per ciascuna stazione vale 800MHz , si ricava il Rate medio di particelle per stazione come segue:

$$\text{Rate medio} = \text{Rate totale} / S_{\text{TOT}} = (800\text{MHz}) / (1620\text{mm}^2) \cong 0.5\text{MHz/mm}^2.$$

Dalle precedenti considerazioni si può constatare quanto risulti necessario garantire delle elevate prestazioni in termini di risoluzione temporale del GigaTracker.

Infatti la scelta di adottare una risoluzione fine, pari al valore efficace di soli 200 picosecondi per ogni stazione GigaTracker, è tale da garantire una buona efficienza nella separazione di eventi molto ravvicinati nel tempo; se invece la risoluzione fosse inadeguata, si potrebbe incappare in erronee assegnazioni di tracce.

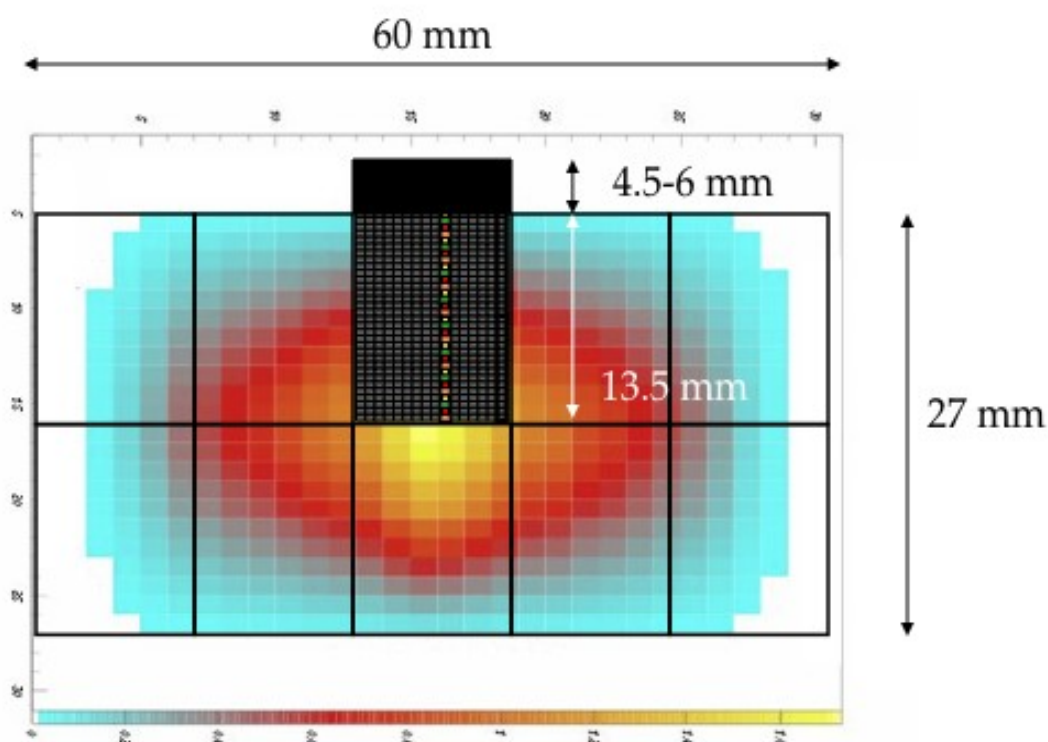


Figura 3.6: esposizione al fascio di particelle della superficie attiva dei dieci chip di read out, organizzati secondo la configurazione di due righe da cinque chip ciascuna. Le connessioni per i wire bonds sono disposte al di fuori dell'area attiva, che è la sola interessata dal fascio.

Con riferimento alla figura precedente, bisogna anche notare che si è effettuata la scelta di utilizzare una configurazione formata da due righe di chip di read out (anziché tre): questa scelta è tale da garantire che il rate

massimo di particelle visto dai singoli chip di read out sia comunque limitato, se confrontato con il rate ancora maggiore che si otterrebbe nel caso di una configurazione a tre righe; in questo caso infatti il chip di read out centrale della riga intermedia si troverebbe esposto al rate di particelle più elevato in assoluto.

Il detector in silicio è formato da 18000 pixel in silicio, ove ciascun pixel è un quadrato di lato 300 micron e spessore 200 micron. Quando un rivelatore in silicio di questo spessore (200 μ m) viene attraversato da una particella carica relativistica, dotata della quantità di moto $P_K = 75\text{GeV}/c$, vengono conseguentemente liberate circa 15000 coppie elettrone-lacuna.

3.8 Requisiti termici e potenza dissipata

Il GigaTracker è un oggetto molto complesso, il quale deve essere in grado di rivelare un elevatissimo numero di eventi: infatti il numero di particelle incidenti ogni giorno, sulla zona centrale del detector in silicio, vale circa 2×10^{12} particelle/cm². Sono attesi un totale di 5×10^{12} decadimenti da kaoni all'anno.

Di conseguenza i chip di read out devono essere in grado di rilevare un elevato numero di eventi e sono quindi progettati per funzionare ad una frequenza di clock $f_{CK} = 160\text{MHz}$ oppure 320MHz a seconda dell'architettura implementata.

Da ciò deriva un significativo consumo di potenza e conseguente surriscaldamento del GigaTracker; infatti la potenza dissipata da un chip aumenta coll'aumentare della sua frequenza di clock: nel presente caso la generazione di potenza dai chip di read out vale circa $(1\div 2)\text{W}/\text{cm}^2$.

Come specifica per la realizzazione fisica dei chip di read out è stato stabilito che la potenza generata (flusso di calore o heat flux) sulla parte attiva dei chip di read out debba sempre essere inferiore al valore limite di $2\text{W}/\text{cm}^2$.

Tenendo poi conto che la superficie totale attiva (S_{TOT}) dei dieci chip di read out vale complessivamente:

$$\begin{aligned} S_{\text{TOT}} &= (13.5\text{mm} \times 2) \times (12\text{mm} \times 5) = \\ &= 27\text{mm} \times 60\text{mm} = 1620\text{mm}^2 = 16.2\text{cm}^2 \end{aligned}$$

si ricava la potenza totale generata (P_{TOT}) dai chip di read out, nel caso limite, come segue:

$$P_{\text{TOT}} = 16.2\text{cm}^2 \times 2\text{W}/\text{cm}^2 = 32.4\text{W}$$

La generazione di potenza dai chip di read out determina un flusso di calore che si disperderà sul GigaTracker secondo tutte le direzioni; bisogna invece notare che il contributo termico dovuto all'irraggiamento dal fascio di particelle risulta trascurabile agli effetti pratici.

3.9 Resistenza del materiale alla radiazione

Come visto al paragrafo precedente, il GigaTracker è interessato da un significativo consumo di potenza; infatti la potenza complessivamente

generata dai chip di read out vale $P_{TOT} = 32.4W$. Si tratta di una potenza notevole, anche in considerazione del fatto che le dimensioni del GigaTracker sono piuttosto limitate.

A causa di ciò si produce del calore e quindi il sensore si degrada; più in dettaglio il calore in eccesso determina un inevitabile aumento della temperatura del GigaTracker ed in particolare si avrà un incremento della temperatura del detector in silicio.

Di conseguenza succede che le sue proprietà elettriche vengono fortemente degradate dall'alta temperatura e dalla radiazione, la quale agisce più fortemente se la temperatura è alta. In via preliminare è stato effettuato uno studio di irraggiamento su dei diodi al silicio [9], al fine di poter valutare quanto vale la resistenza alla radiazione del silicio in funzione della temperatura.

Lo studio di irraggiamento suddetto ha coinvolto sedici diodi a giunzione p-n: tali diodi sono stati irradiati con dei flussi di intensità variabile, compresa fra $1 * 10^{12}$ e $2 * 10^{14}$ $1MeV n_{eq}/cm^2$ (neutroni di impulso 1MeV per centimetro quadrato).

Gli effetti di danneggiamento indotti dall'esposizione del silicio a questi flussi di particelle sono stati studiati mediante la misura della carica raccolta, con l'ausilio di un preamplificatore a canale singolo. Sono state altresì misurate la tensione di svuotamento (depletion voltage) e la corrente di perdita (leakage current); attualmente le problematiche principali legate al deterioramento del silicio sono dovute alla corrente di perdita. Da tale studio si è potuto evincere che è necessario garantire una temperatura del sensore in silicio sempre inferiore ai $5^{\circ}C$, affinché la durata di vita del sensore stesso sia dell'ordine di grandezza di un run di presa dati, ovvero cento giorni. Durante questo arco di tempo ci si aspetta, nella parte centrale

del sensore, un flusso di particelle incidenti equivalente ad un massimo di circa $2 * 10^{14}$ 1MeV n_{eq}/cm^2 .

3.10 Ambiente operativo ed esigenza di un sistema di raffreddamento

Per concludere è opportuno porre l'accento sul fatto che tutte e tre le stazioni GigaTracker vengono collocate all'interno di un tubo a vuoto alto (10^{-6} Torr), onde evitare la presenza di ulteriore materiale addizionale sul percorso del fascio ed i conseguenti fenomeni di diffusione multipla e interazione nucleare che inevitabilmente ne scaturirebbero; si tratta dunque di un ambiente operativo limite e naturalmente ciò è fonte di notevoli complicazioni.

Tenendo in considerazione la generazione di potenza dai chip di read out, l'elevatissimo numero di particelle incidenti sul detector in silicio, la massa assai ridotta del GigaTracker, nonché le sfavorevoli condizioni operative (nel vuoto) in cui esso dovrà lavorare, si rende assolutamente necessaria l'adozione di un efficace sistema di raffreddamento: il suo scopo è quello di mantenere la temperatura del detector in silicio sempre al di sotto della temperatura $T_{MAX} = 5^{\circ}C$.

Tale sistema deve essere realizzato senza comportare un incremento significativo del budget di materiale, il quale deve comunque restare inferiore a $0.5\% X_0$; infatti lo spessore totale attraversato dal fascio deve rimanere trascurabile onde evitare di perturbare in modo significativo il cammino delle particelle.

Capitolo 4

Simulazioni con il software I-DEAS 12

4.1 Generalità sul CAD I-DEAS 12

Il software I-DEAS 12 è un CAD integrato che permette di generare modelli solidi, di simularne le condizioni di esercizio e di realizzare le parti che compongono il modello. La simulazione si ottiene discretizzando il modello secondo una meshatura bi-tridimensionale generata da appositi algoritmi che ne permettono l'ottimizzazione.

Innanzitutto il software I-DEAS 12 consente la realizzazione in altissima risoluzione di oggetti tridimensionali di qualsiasi forma e dimensione: tali oggetti, altresì noti come PART, sono composti da volumi e superfici. Dopodichè il programma consente la costruzione e l'analisi di modelli ad elementi finiti (Finite Element Model FEM), che si applicano sugli oggetti 3D; un passaggio fondamentale per la loro creazione è la partizione di ogni volume dell'oggetto secondo un tessuto di elementi di base (mesh): nella fattispecie si tratta di tetraedri solidi di tipo lineare o parabolico.

4.2 Struttura del software

Il programma I-DEAS 12 presenta un'interfaccia divisa in quattro parti, ovvero l'area di grafica, l'area I-DEAS List, l'area I-DEAS Prompt e l'area

delle icone di I-DEAS. In tal modo si possono svolgere delle simulazioni, avvalendosi dei comandi di generazione e di gestione tramite icone presenti sul video.

Naturalmente la parte più evidente è l'area di grafica, cioè il piano di lavoro (workplane) contenente l'oggetto 3D (PART).

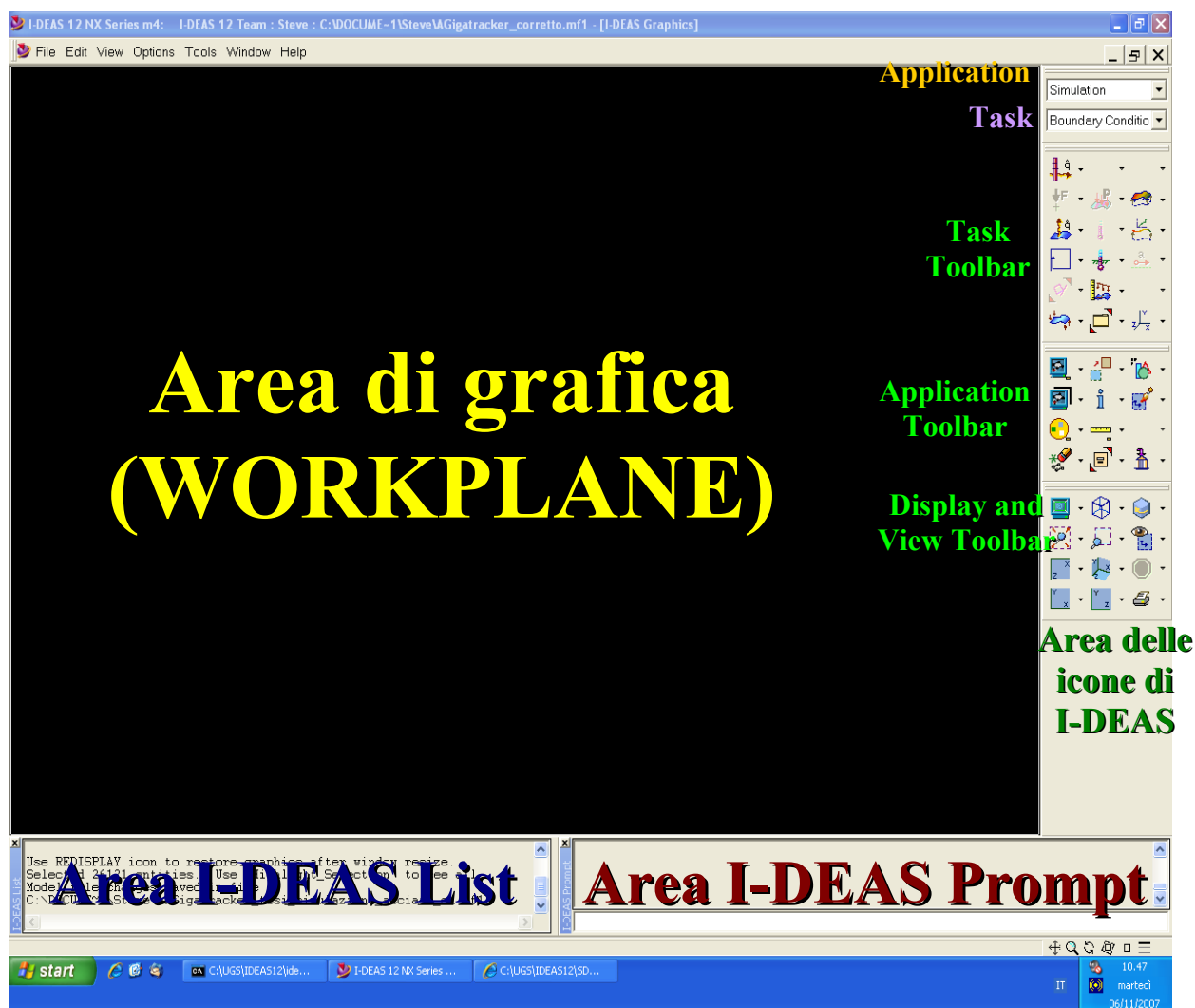


Figura 4.1: suddivisione in quattro parti della schermata di I-DEAS 12: la parte più cospicua dello schermo(in nero) risulta occupata dall'area di grafica o piano di lavoro; in basso a sinistra è visibile l'area I-DEAS List mentre in basso a destra è visibile l'area I-DEAS Prompt; sulla destra dello schermo è infine presente l'area delle icone di I-DEAS.

Dopodichè è presente l'area I-DEAS List, la quale si occupa di mostrare l'informazione in uscita generata dai vari comandi utilizzati dal progettista. E' inoltre presente l'area I-DEAS Prompt, in cui bisogna inserire le informazioni necessarie per completare un comando o processo (ad esempio potrebbe essere necessario specificare il valore di una dimensione).

Per finire bisogna citare l'area delle icone di I-DEAS, la quale contiene tutti i comandi disponibili per compiere ogni possibile operazione prevista dal software. Essa contiene inoltre dei menù a tendina per selezionare applicazioni e tasks.

Infatti il software è suddiviso secondo un certo numero di applicazioni, fra cui è il caso di ricordare le due più spesso utilizzate, ovvero "DESIGN" e "SIMULATION". Ciascuna applicazione è suddivisa secondo una struttura a tasks, per lo svolgimento di operazioni specifiche. Nel presente caso si opererà nell'ambito dell'applicazione SIMULATION, con i tasks seguenti: "MASTER MODELER", "MESHING", "BOUNDARY CONDITIONS", "MODEL SOLUTION".

4.3 Analisi utilizzate

Operando all'interno dell'applicazione SIMULATION, ci si avvale innanzitutto del task MASTER MODELER onde modellare l'oggetto tridimensionale su cui si potranno compiere alcune simulazioni: come noto, esso è costituito da volumi e superfici.

Successivamente si sfrutta il task MESHING al fine di discretizzare il modello, organizzando i volumi per la generazione della mesh. E' possibile

definire i materiali con le loro caratteristiche; dopodiché si può assegnare a ciascun volume un materiale.

Sul modello fisico 3D così predisposto si possono compiere, fra l'altro, delle analisi elastico-strutturali, termiche o termo-elastiche; a tal scopo ci si avvale del task BOUNDARY CONDITIONS per selezionare il tipo di analisi da compiere ed impostare le condizioni al contorno del problema. Un'analisi elastico-strutturale richiede di specificare vincoli strutturali (displacement restraints) e carichi come forze e/o pressioni.

Un'analisi termica richiede di specificare vincoli termici (temperature restraints) e carichi termici (thermal loads) ovvero dei flussi di calore (heat fluxes). Oltre alla conduzione, è possibile impostare degli scambi di calore per convezione e/o irraggiamento.

Un'analisi termo-elastica viene invece svolta in due fasi: si deve svolgere innanzitutto una analisi termica il cui risultato è una distribuzione di temperatura, da usare a sua volta come carico termico per la successiva analisi elastico-strutturale.

4.4 Modellazione di una stazione di rilevamento GigaTracker tramite il software I-DEAS 12

Nell'ambito dell'esperimento NA62 al CERN si ricorre all'uso del software I-DEAS 12 per compiere delle simulazioni riguardanti il comportamento del rivelatore GigaTracker.

Ciascuna stazione GigaTracker è costituita da un sensore a pixel di silicio (Si), collegata mediante bump bonds in stagno e piombo (Sn-Pb) a dieci chip di read out in silicio (Si) sottostanti; di fianco ad essi trovano

collocazione delle piste metalliche laterali in oro (Au) o rame (Cu), ove il collegamento fra tali piste e i chip avviene per mezzo di appositi wire bonds in rame (Cu). Infine la struttura poggia su di un supporto meccanico, che può anche fungere da struttura di raffreddamento.

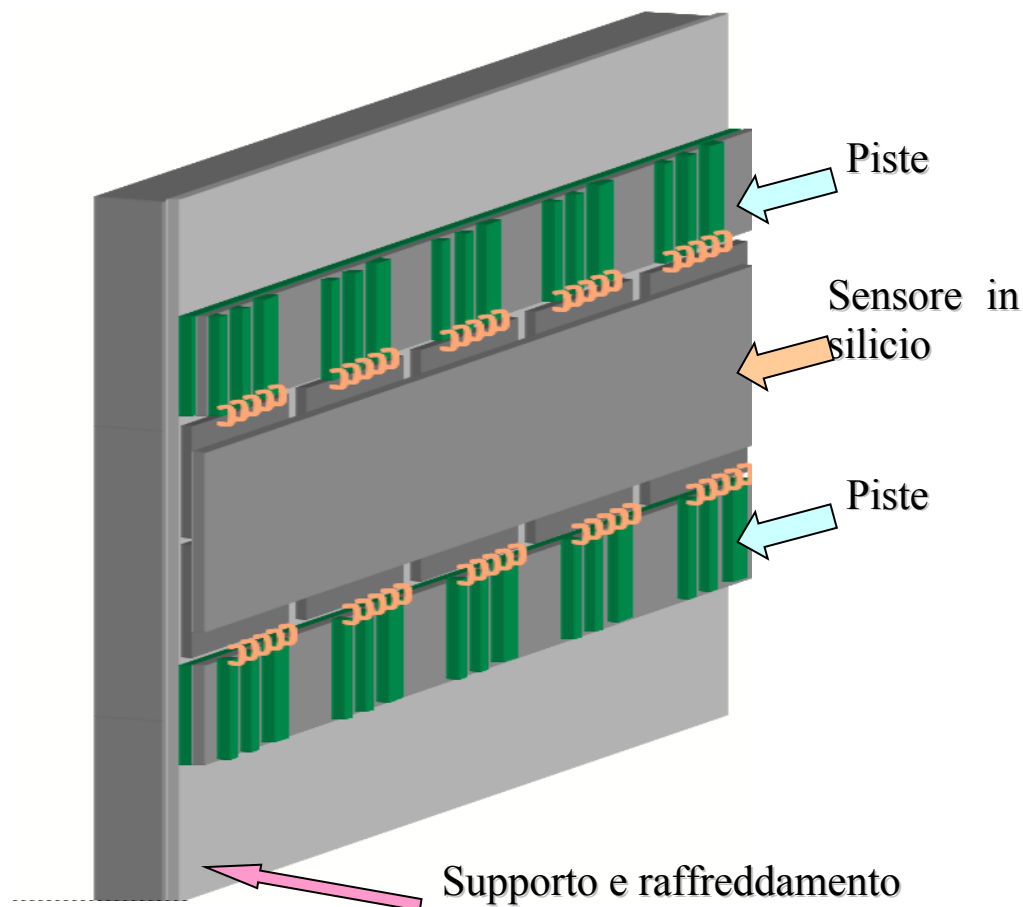


Figura 4.2: aspetto del rivelatore GigaTracker; sono evidenti il sensore in silicio, le piste metalliche laterali e il supporto meccanico e di raffreddamento.

Senza rientrare qui nel merito delle funzioni svolte da ciascuna parte del GigaTracker, in quanto già ampiamente trattate nel corso del capitolo

precedente, in particolare al paragrafo 3.5, si ricordano brevemente qui di seguito le dimensioni occupate dai vari volumi. Innanzitutto il rivelatore, ovvero una matrice formata da 18000 pixel in silicio, è un rettangolo delle dimensioni di 60mm x 27mm avente uno spessore di 200 micron.

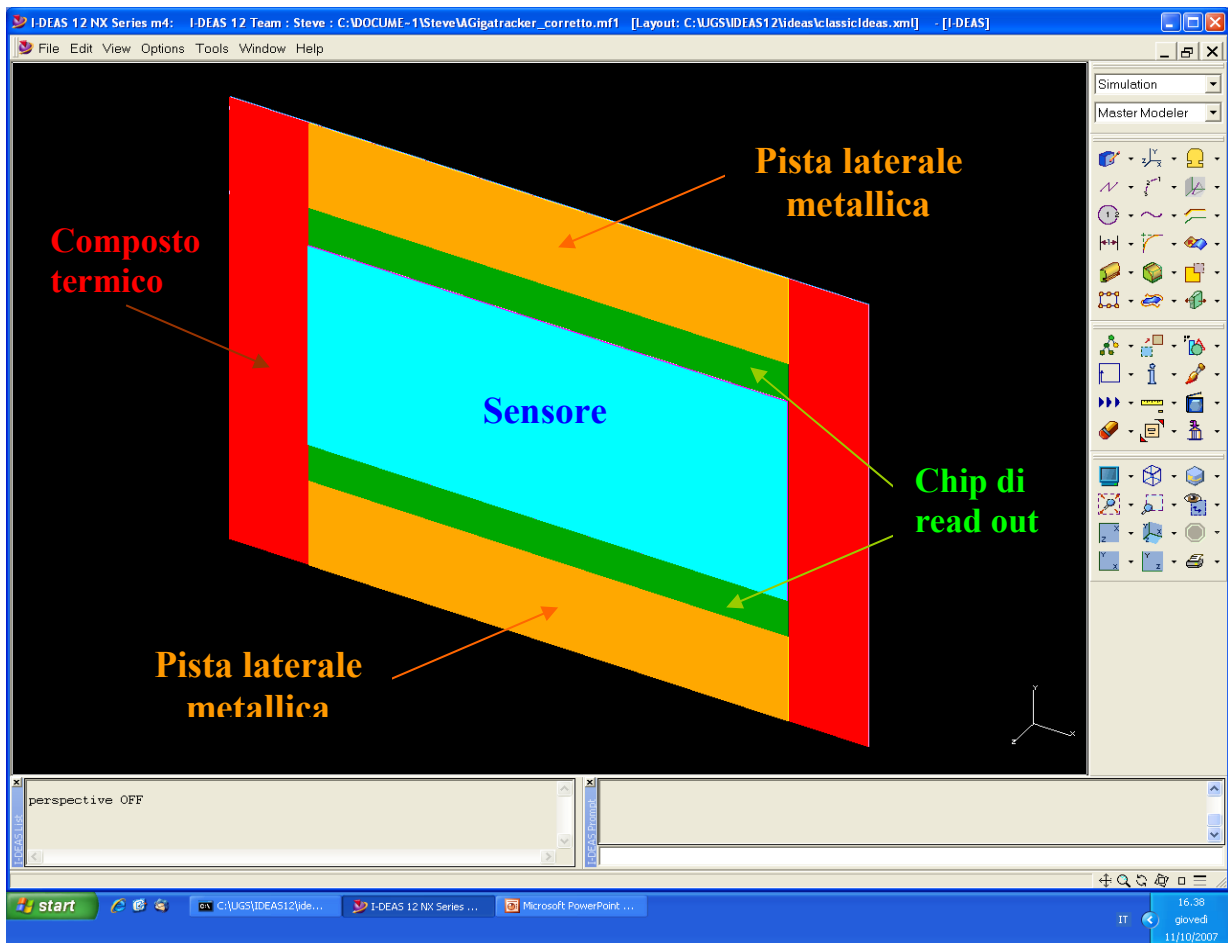


Figura 4.3: modellazione della Part GigaTracker tramite I-DEAS 12; il volume azzurro è il sensore in silicio mentre il volume parzialmente visibile in verde rappresenta i chip di read out in silicio (i bump bonds sono modellati come un foglio sottile in mezzo ad essi). I volumi in arancione rappresentano le piste metalliche mentre il volume parzialmente visibile in rosso è un composto applicato per garantire il contatto termico.

Alla sua base sono previsti 18000 bump bonds, ovvero gocce di stagno-piombo di diametro 25 micron; per maggiore semplicità si possono schematizzare come un foglio unico delle dimensioni di 60mm x 27mm, con lo spessore di 25 micron.

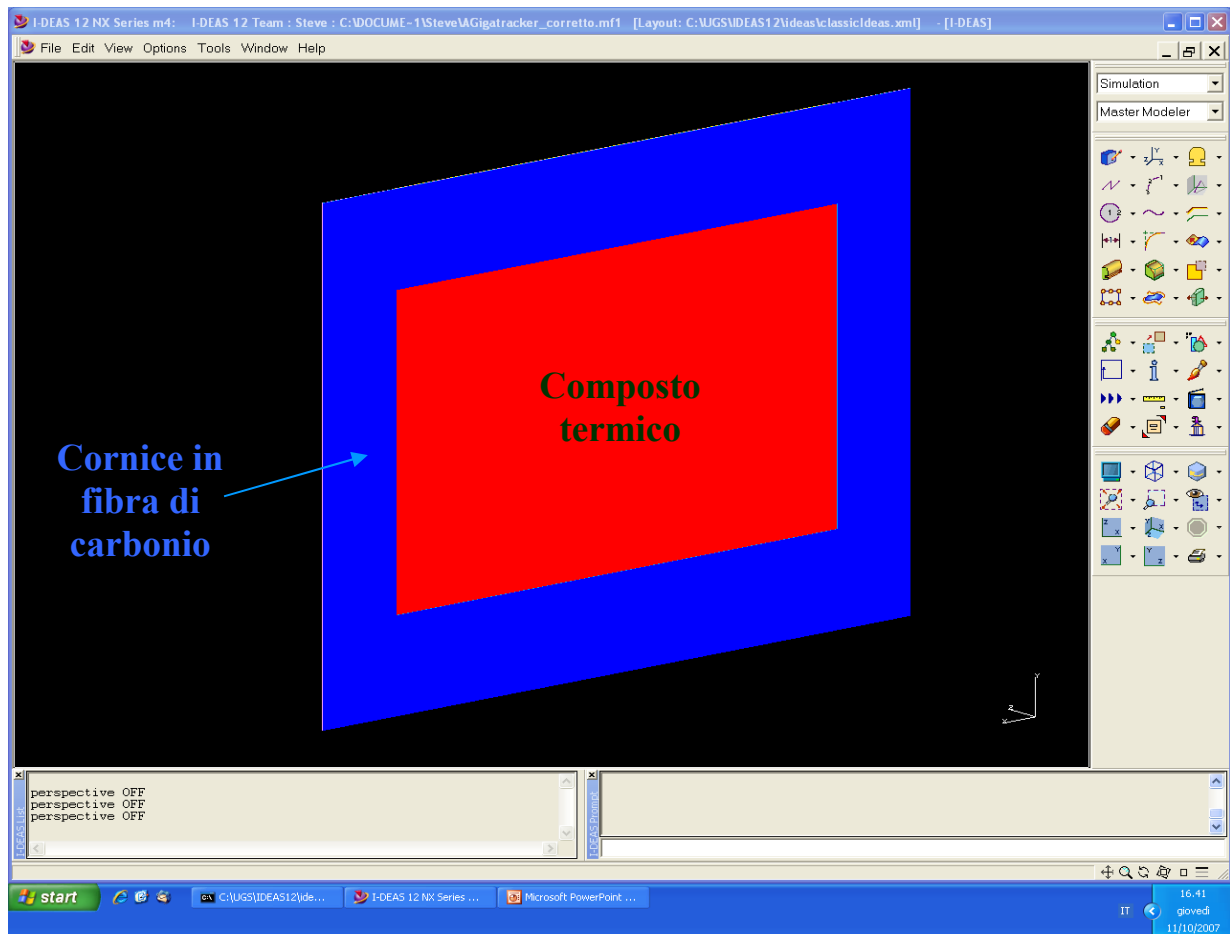


Figura 4.4: vista dal retro della Part GigaTracker; il volume blu è la cornice in fibra di carbonio mentre il volume parzialmente visibile in rosso è il composto termico.

Sono anche utilizzati dieci chip di read out in silicio, che si possono schematizzare come un foglio unico delle dimensioni di 60mm x 37mm,

con lo spessore di 100 micron. Le piste metalliche laterali in oro o rame hanno dimensioni nominali di 60mm x 11.5mm e spessore di 100 micron; i wire bonds in rame vengono per ora tralasciati, in quanto il loro apporto all'analisi termica è trascurabile.

Per quanto riguarda il supporto meccanico e di raffreddamento, bisogna precisare che esso è soltanto utilizzato per questo primo studio preliminare, dato che in seguito sono state considerate delle soluzioni alternative che non ne prevedono l'utilizzo.

Ad ogni modo esso è costituito innanzitutto da un composto termico (thermal compound) delle dimensioni di 80mm x 60mm, con lo spessore di 100 micron, applicato per garantire il contatto termico.

Sul suo retro è poi presente una cornice in fibra di carbonio, cioè un volume delle dimensioni di 80mm x 60mm, con lo spessore di 100 micron, dotata di una finestra rettangolare (onde evitare materiale aggiuntivo attraverso il fascio di particelle) di dimensioni 60mm x 37mm e con lo spessore di 100 micron.

4.5 Partizione dei volumi

Tramite l'utilizzo del task MESHING si possono partizionare i volumi dell'oggetto in un tessuto di tetraedri solidi lineari o parabolici; si sono svolte numerose prove sia con elementi lineari che parabolici, senza che si evidenziassero differenze significative nei risultati ottenuti: ciò è dovuto al fatto che la geometria dell'oggetto in esame è semplice, senza superfici sferiche e/o cilindriche. Nel seguito si farà riferimento ad una versione leggermente semplificata del GigaTracker, in cui vengono omessi i due

volumi relativi alle piste metalliche laterali, come mostrato nella seguente figura.

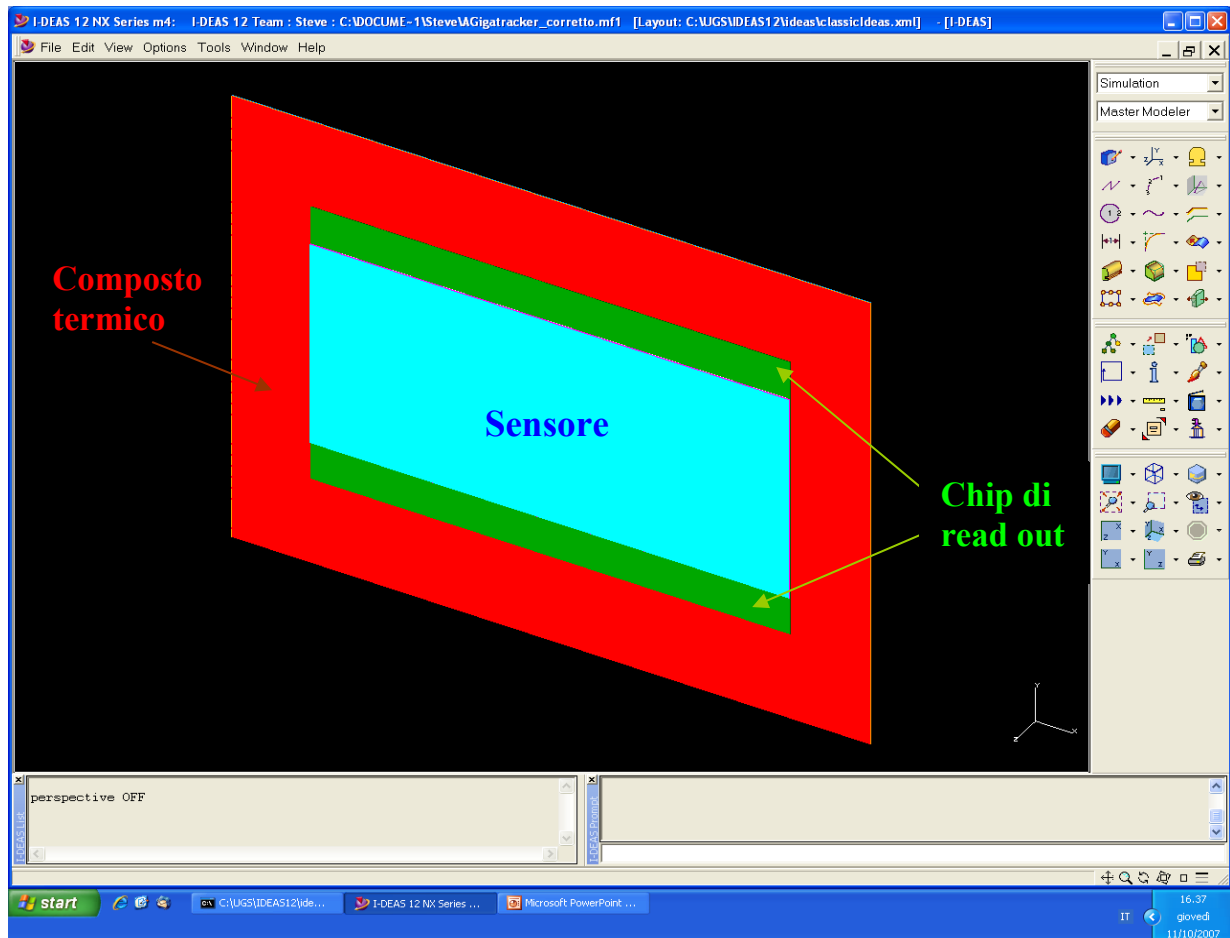


Figura 4.5: modellazione della Part GigaTracker semplificata; il volume azzurro rappresenta il sensore in silicio mentre il volume parzialmente visibile in verde serve a rappresentare i chip di read out in silicio. Infine il volume parzialmente visibile in rosso costituisce il composto termico (thermal compound).

In questo caso ci si è avvalsi dell'algoritmo Delaunay per la generazione di una mesh e si è scelto di utilizzare come dimensione tipica dei tetraedri un

valore di 3mm (Element Length). Si possono usare vari algoritmi di meshatura per la generazione in automatico della mesh, ovvero il TriQuaMesh, l'Advancing Front e il Delaunay.

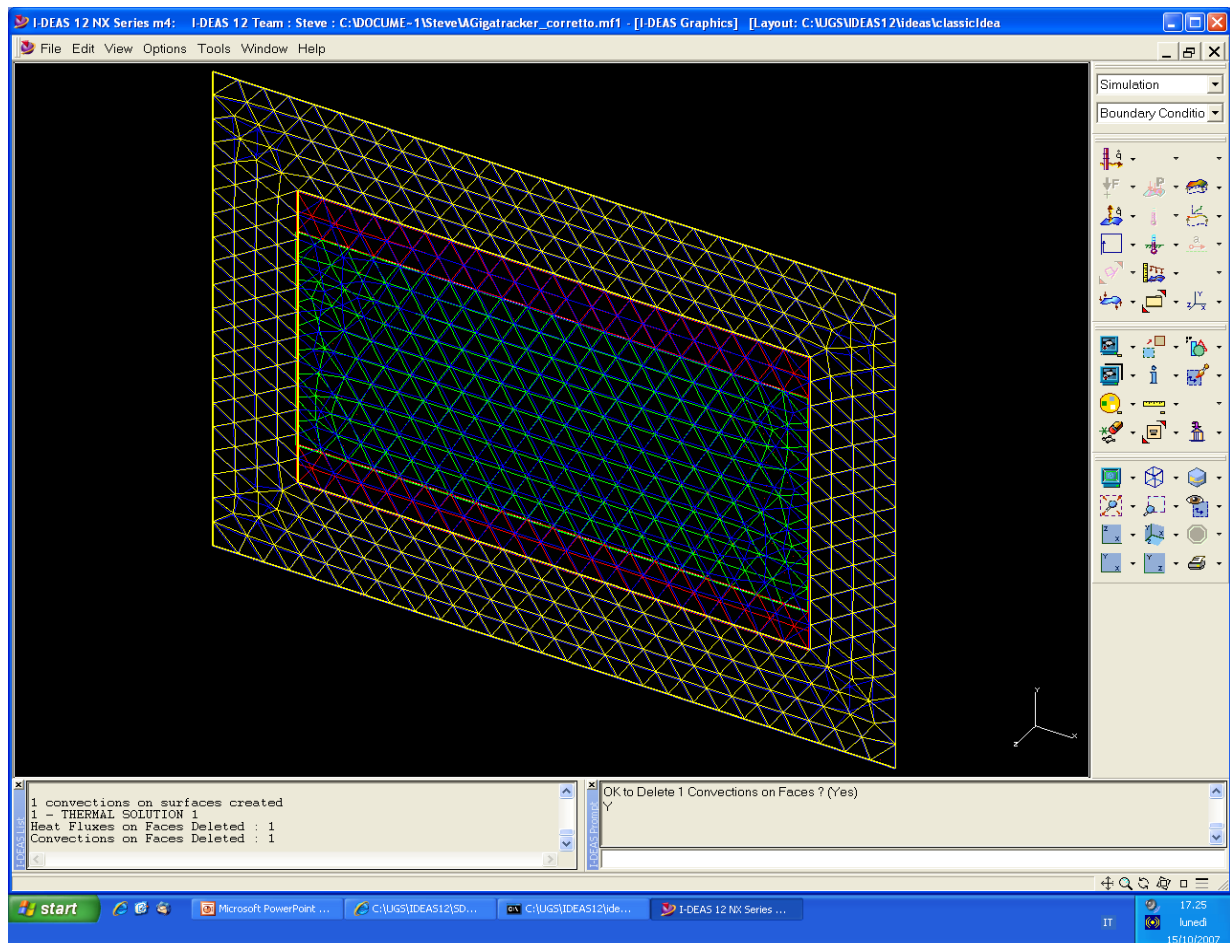


Figura 4.6: discretizzazione dei volumi tramite una mesh.

Durante il procedimento di creazione della mesh si devono anche assegnare i materiali ai vari volumi; tali materiali vengono definiti dal progettista, specificandone i valori delle loro proprietà fisiche. Nella tabella data di seguito si riportano i valori specificati per le grandezze

fisiche relative ai materiali utilizzati nel rivelatore GigaTracker nel corso della presente simulazione.

Proprietà dei materiali	Modulo di Young [Pa]	Coefficiente di Poisson	Densità di massa [Kg/m ³]	Modulo di taglio [Pa]	Coefficiente di dilatazione termica [K ⁻¹]	Conducibilità termica [W/(m*K)]
Silicio (Si)	47*10 ⁹	0.25	2330	17*10 ⁹	2.6*10 ⁻⁶	205
Bump bond (Sn-Pb) modificati	33*10 ⁹	0.4	9500	11.8*10 ⁹	25.5*10 ⁻⁶	0.4
Composto termico Arctic Silver	87*10 ⁹	0.32	5670	33*10 ⁹	19.6*10 ⁻⁶	8.7
Composto termico Akasa AK-TC 5022	156*10 ⁹	0.22	1129	64*10 ⁹	165*10 ⁻⁶	4
Fibra di carbonio K1100	137.5*10 ⁹	0.3	2200	51*10 ⁹	7.1*10 ⁻⁶	1000
Rame (Cu)	130*10 ⁹	0.34	8920	48*10 ⁹	16.5*10 ⁻⁶	400
Oro (Au)	78*10 ⁹	0.44	19300	27*10 ⁹	14.2*10 ⁻⁶	320

Tabella 4.1: materiali usati nel GigaTracker; in questa sede si specificano solamente i valori delle grandezze fisiche necessarie per compiere le analisi termiche e termo-elastiche.

Si devono specificare le seguenti sei grandezze, per poter compiere dapprima un'analisi termica e poi un'analisi termo-elastica:

- conducibilità termica, *thermal conductivity* [W/(m*K) oppure, analogamente W/(m*°C)];
- coefficiente di dilatazione termica, *coefficient of thermal expansion* [K⁻¹ oppure, analogamente °C⁻¹];
- massa volumica, *mass density* [Kg/m³];
- modulo di Young, *modulus of elasticity* [Pa];
- coefficiente di Poisson, *Poisson's ratio* [adimensionale];
- modulo di taglio, *shear modulus* [Pa].

4.6 Applicazione delle condizioni al contorno

Come noto, il GigaTracker è adibito alla rilevazione di un elevatissimo numero di eventi: di conseguenza i chip di read out sono progettati per operare ad una frequenza di clock notevole, per cui ne deriva un elevato consumo di potenza.

Nell'ambito del task BOUNDARY CONDITIONS si possono specificare le condizioni al contorno del problema: si deve impostare una analisi termica (Heat Transfer) e applicare sulla superficie attiva dei chip di read out il flusso di calore: $\text{Heat Flux} = 2\text{W/cm}^2 = 20000\text{W/m}^2 = 20\text{KW/m}^2$. Difatti, con riferimento al paragrafo 3.8 del capitolo precedente, si assume una siffatta generazione di potenza sulla parte attiva dei chip di read out come dato di progetto ($P \leq 2\text{W/cm}^2$). Assumendo questo valore limite superiore si effettua lo studio sotto le condizioni di caso peggiore.

E' opportuno richiamare l'attenzione sul fatto che tale potenza si genera unicamente sulla superficie attiva dei chip di read out, che è pari ad un quadrato delle dimensioni di 60mm x 27mm.

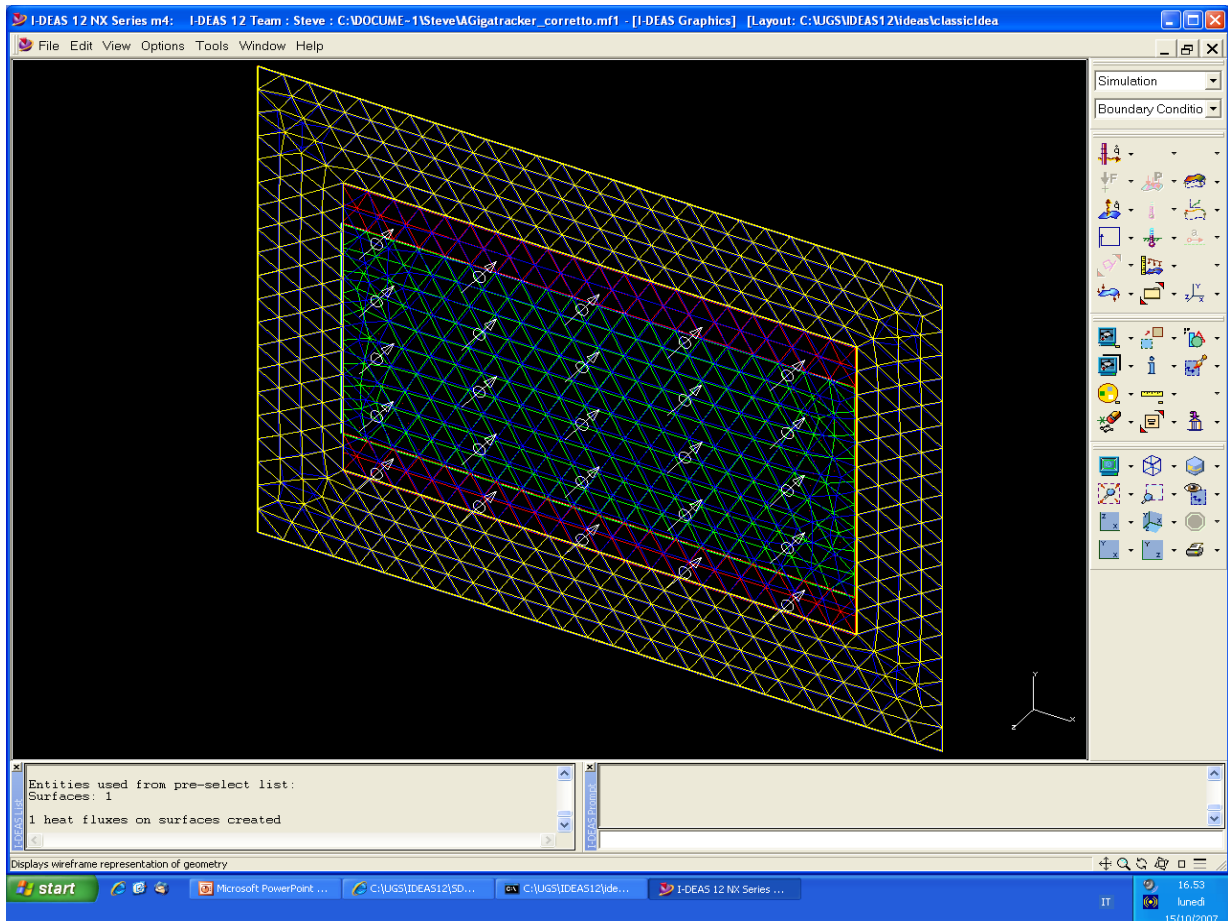


Figura 4.7: impostazione dell'Heat Flux su una superficie attiva principale dei chip di read out (illustrato tramite le frecce bianche).

Poichè I chip di read out sono modellati come un foglio molto sottile, si considera una sola superficie principale, la cui estensione totale è pari a $S_{TOT} = 1620\text{mm}^2 = 16.2\text{cm}^2$, e non entrambe (ovvero quella inferiore e quella superiore).

La potenza complessivamente generata vale $P_{TOT} = 32.4W$ ed il flusso di calore che ne deriva si disperde sul GigaTracker: a causa di ciò ne consegue un degrado delle caratteristiche elettriche e si riduce la durata di vita del sensore.

4.7 Simulazione di raffreddamento

Al fine di garantire una durata di vita del GigaTracker pari ad almeno cento giorni (cioè la durata di un anno di presa dati), è necessario progettare un sistema di raffreddamento dello stesso, tale da mantenerne la temperatura sempre al di sotto di $T_{MAX} = 5^{\circ}C$ (in particolare ci si riferisce qui alla temperatura del sensore in silicio): per questo scopo si sono compiute varie simulazioni di diversi scenari.

Bisogna predisporre un sistema di raffreddamento che utilizzi una quantità di materiale trascurabile rispetto alla massa del GigaTracker, in modo da non perturbare il fascio di particelle. Con il task BOUNDARY CONDITIONS è possibile stabilire dei vincoli termici (temperature restraints) e degli scambi di calore per conduzione, convezione e irraggiamento: nel presente caso si predispongono scambi termici per convezione e conduzione con azoto gassoso. Le situazioni di distribuzione termica studiate, al fine di ottimizzare il raffreddamento del rivelatore, sono le seguenti:

- la conduttura in cui flussa azoto è aderente al retro del GigaTracker;
- la conduttura in cui flussa azoto è aderente ai lati del GigaTracker;
- il GigaTracker risulta inserito nella conduttura in cui flussa azoto.

Bisogna tenere presente che è anche necessario impostare una opportuna temperatura di riferimento Temperature Set, per la valutazione delle caratteristiche termiche: questa viene denominata Room Temperature e può essere fissata a 21.85°C, se non specificato diversamente.

4.8 Conduttura di flussaggio gas

Nella presente simulazione si è provato a predisporre una conduttura aderente alla parte posteriore del GigaTracker, entro la quale flussa azoto gassoso.

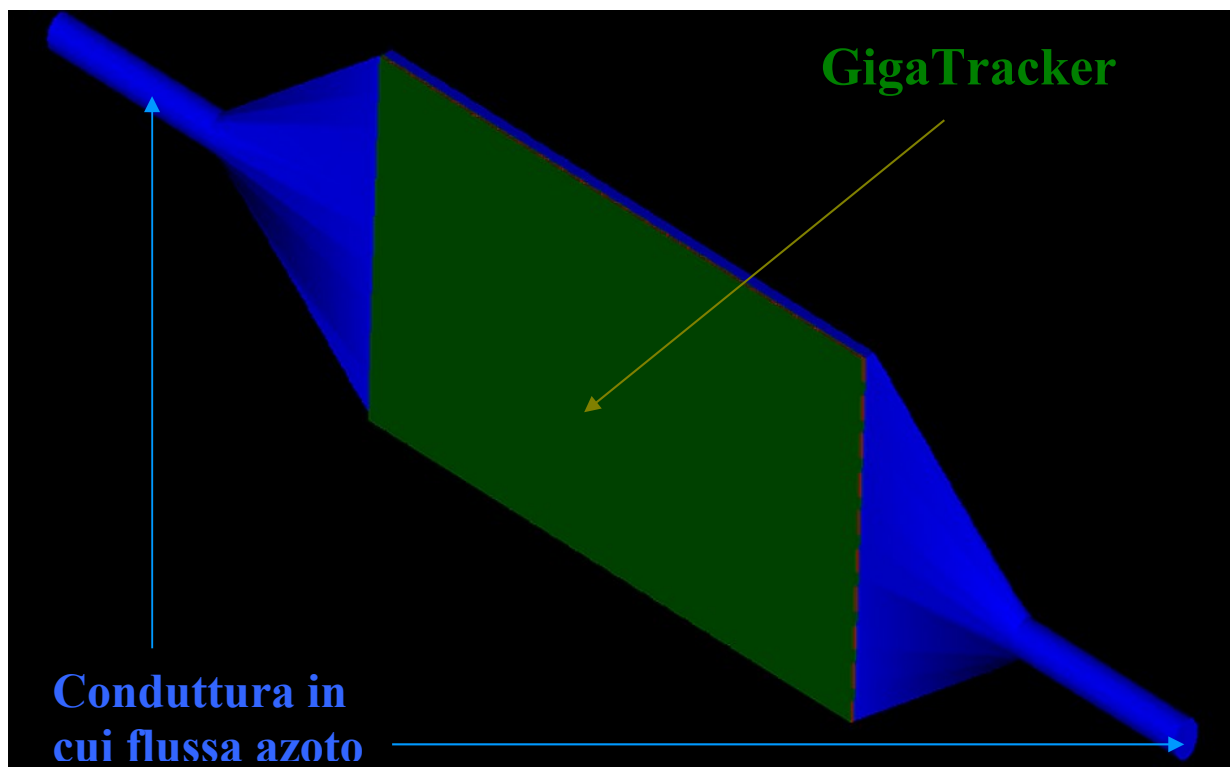


Figura 4.8: conduttura aderente alla superficie posteriore del GigaTracker.

Nello specifico, si è impostato uno scambio termico per convezione con azoto gassoso alla seguente temperatura di ingresso $T_i = -173^{\circ}\text{C}$ e coefficiente di convezione $\alpha = 230\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (scelto dopo numerosi test).

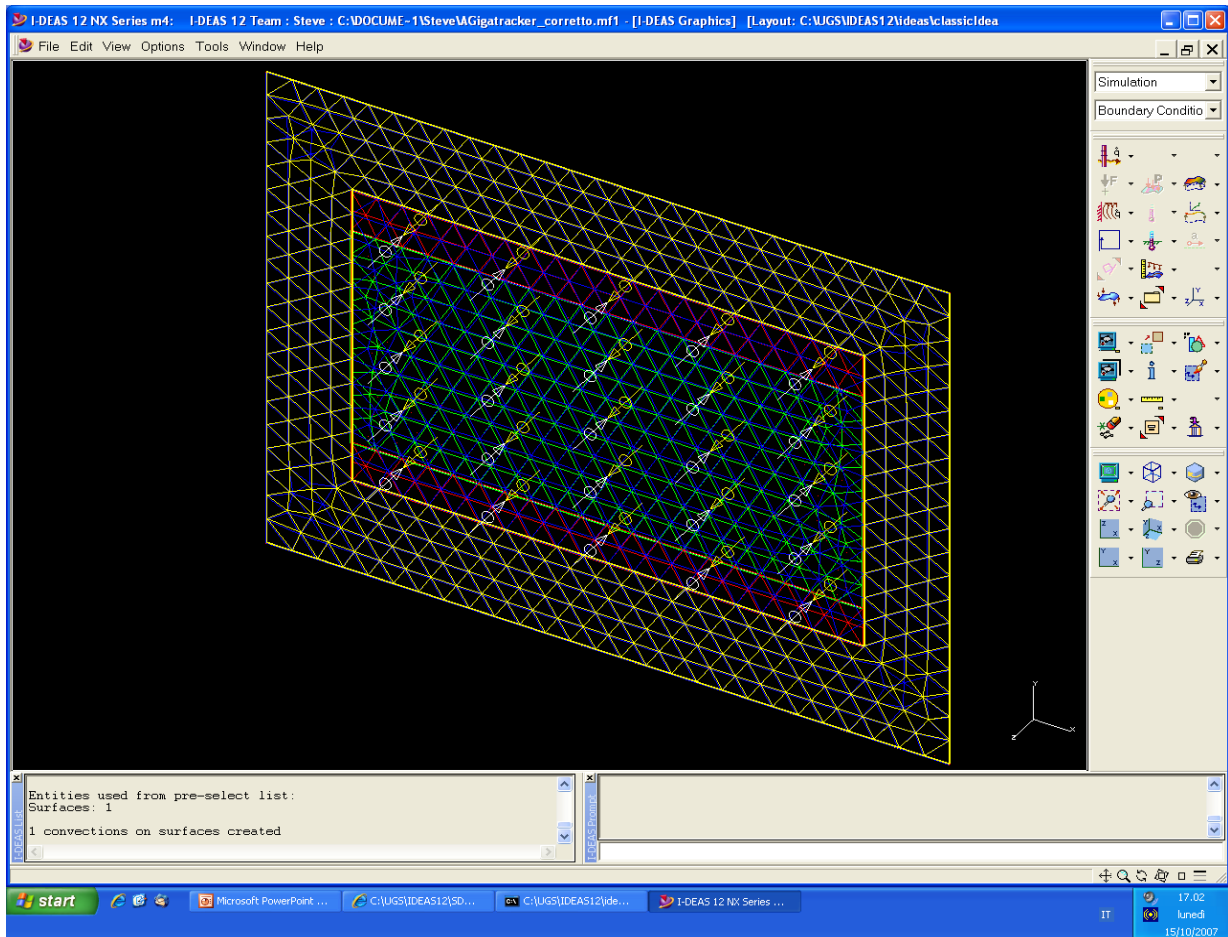


Figura 4.9: impostazione della Convection sulla superficie posteriore del GigaTracker (le frecce gialle rappresentano la convezione con l'azoto gassoso).

Impostata la convezione sulla superficie posteriore del GigaTracker, si completa il modello termico e si può avviare la risoluzione. Il procedimento di risoluzione dei modelli genera le immagini mostrate nelle

pagine a seguire, relativamente alle distribuzioni di temperatura sul GigaTracker e in base ai tipi di composti termici utilizzati.

4.9 Risoluzione del modello termico e scelta dei materiali

Il modello viene risolto in base alle condizioni al contorno impostate: si sono svolte alcune prove con l'utilizzo di diversi tipi di composti termici (thermal compounds), in particolare l'Arctic Silver, caratterizzato dalla conducibilità termica $\lambda = 8.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ e l'Akasa AK-TC 5022, definito da $\lambda = 4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

In entrambi i casi lo spessore del composto termico vale 100 micron; inoltre si adotta un supporto in fibra di carbonio, contraddistinto dalla conducibilità termica $\lambda = 1000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ e con lo spessore di 100 micron: gli spessori dei materiali sono ridotti per non perturbare il fascio di particelle.

4.9.1 Risultati ottenuti con Arctic Silver 5

Nel seguito si fa riferimento all'uso del composto termico Arctic Silver 5; si tratta di una pasta termica formata da una miscela di argento (Ag) polisintetico di alta densità, ossido di zinco (Zn), ossido di alluminio (Al) e tracce di nitrato di boro (B). La conducibilità termica dell'Arctic Silver vale $\lambda = 8.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

In particolare il contenuto di argento in questo composto termico si attesta intorno al 99.9%; l'aggiunta degli ossidi e del nitrato precedentemente menzionati serve per migliorare le prestazioni del composto e assicurarne la stabilità a lungo termine. Infine bisogna notare che l'Arctic Silver non contiene silicio.

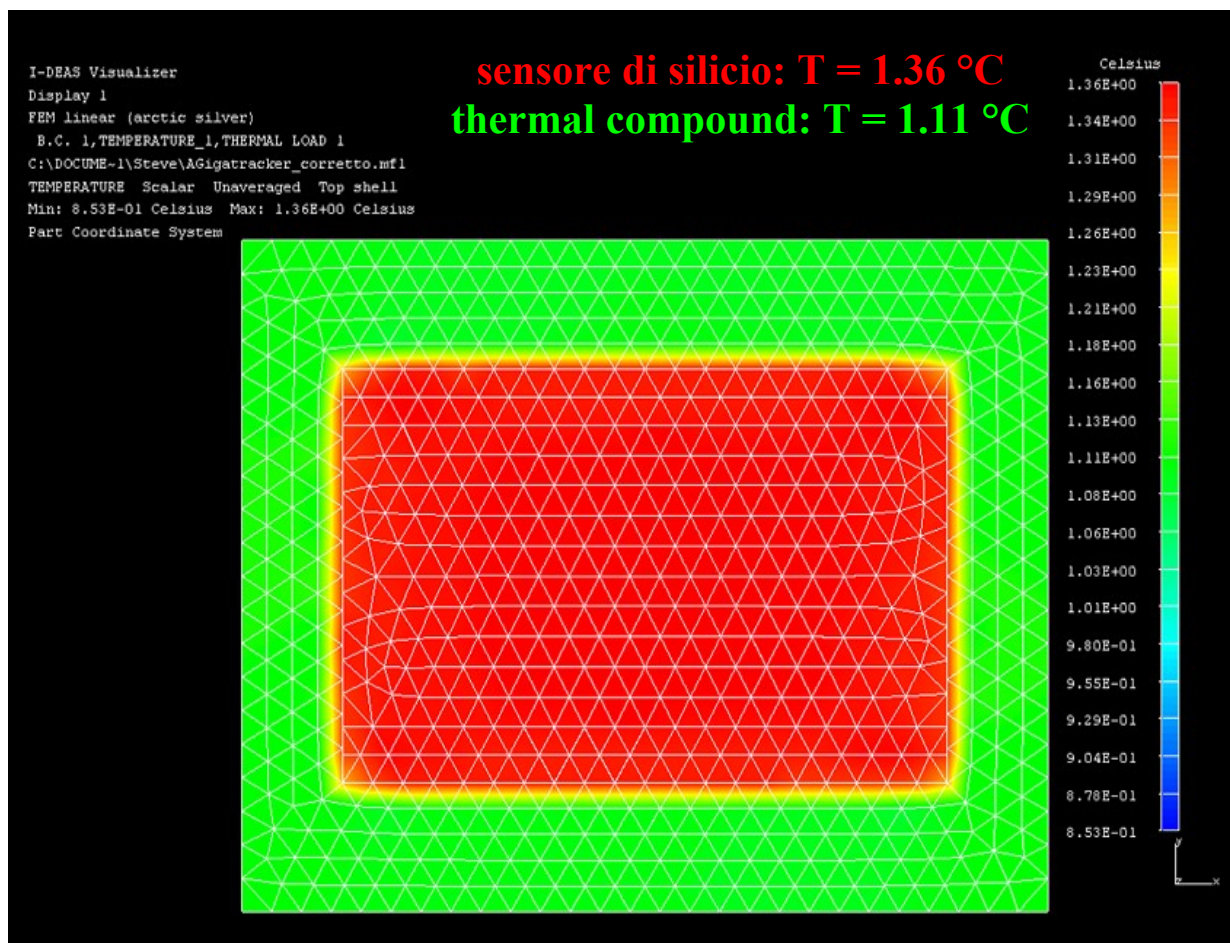


Figura 4.10: distribuzione di temperatura sulla parte frontale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Arctic Silver.

L'Arctic Silver è caratterizzato da una buona conduzione termica ed è usato nel presente caso al fine di indurre un abbassamento della

temperatura dei chip di read out e del sensore, di conseguenza. Infatti l'Arctic Silver è fra i migliori composti termici presenti oggi sul mercato per applicazioni riguardanti il raffreddamento dei circuiti integrati. Le suddette prestazioni sono raggiungibili in virtù del fatto che la pasta massimizza l'area di contatto ed il trasferimento termico fra particelle adiacenti.

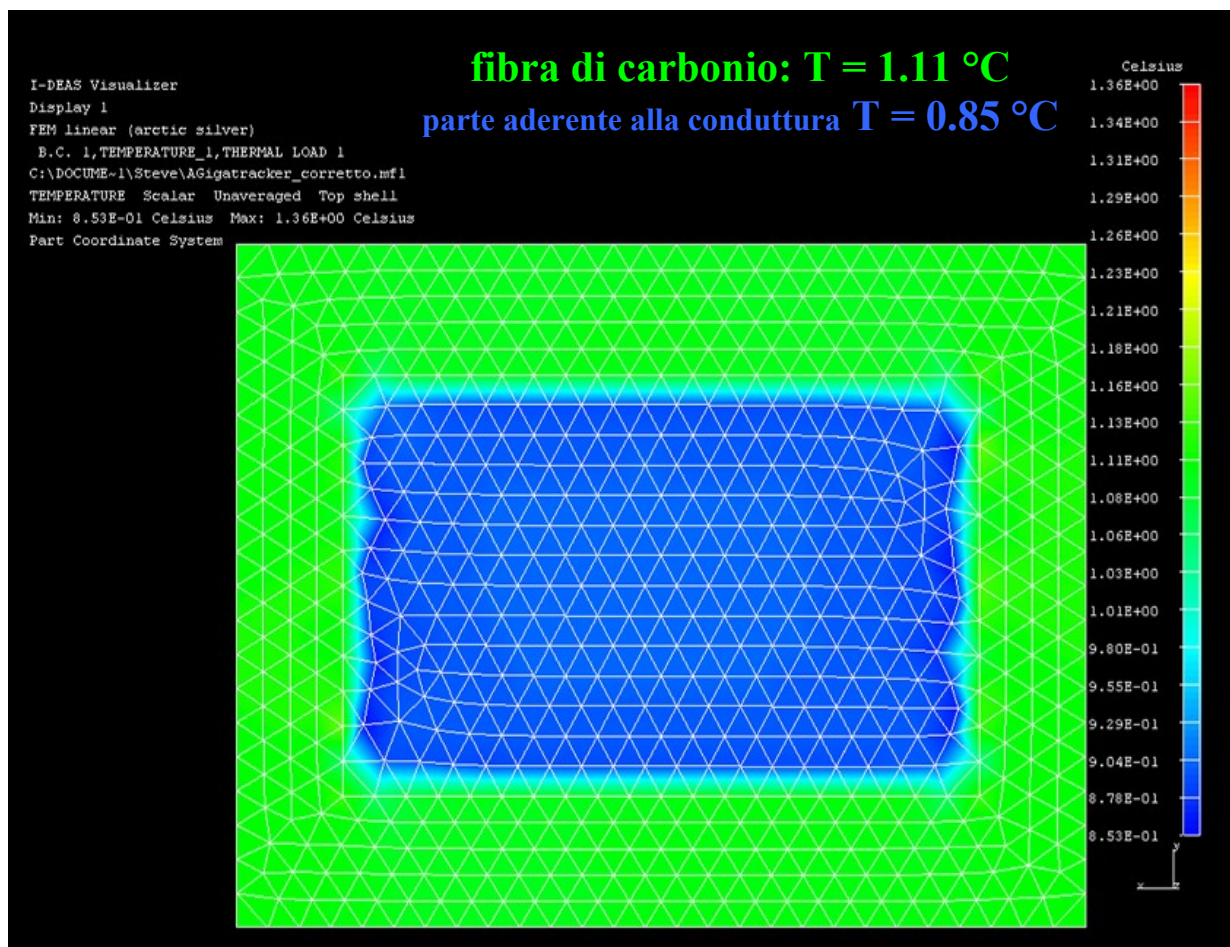


Figura 4.11: distribuzione di temperatura sulla parte posteriore del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Arctic Silver.

Più in dettaglio, l'Arctic Silver è una pasta termica specificatamente realizzata allo scopo di massimizzare la conduttività termica fra

microprocessori, tipicamente, ed il telaio o scheda madre su cui viene montata la CPU. Così facendo il telaio funge da dissipatore di calore (heatsink).

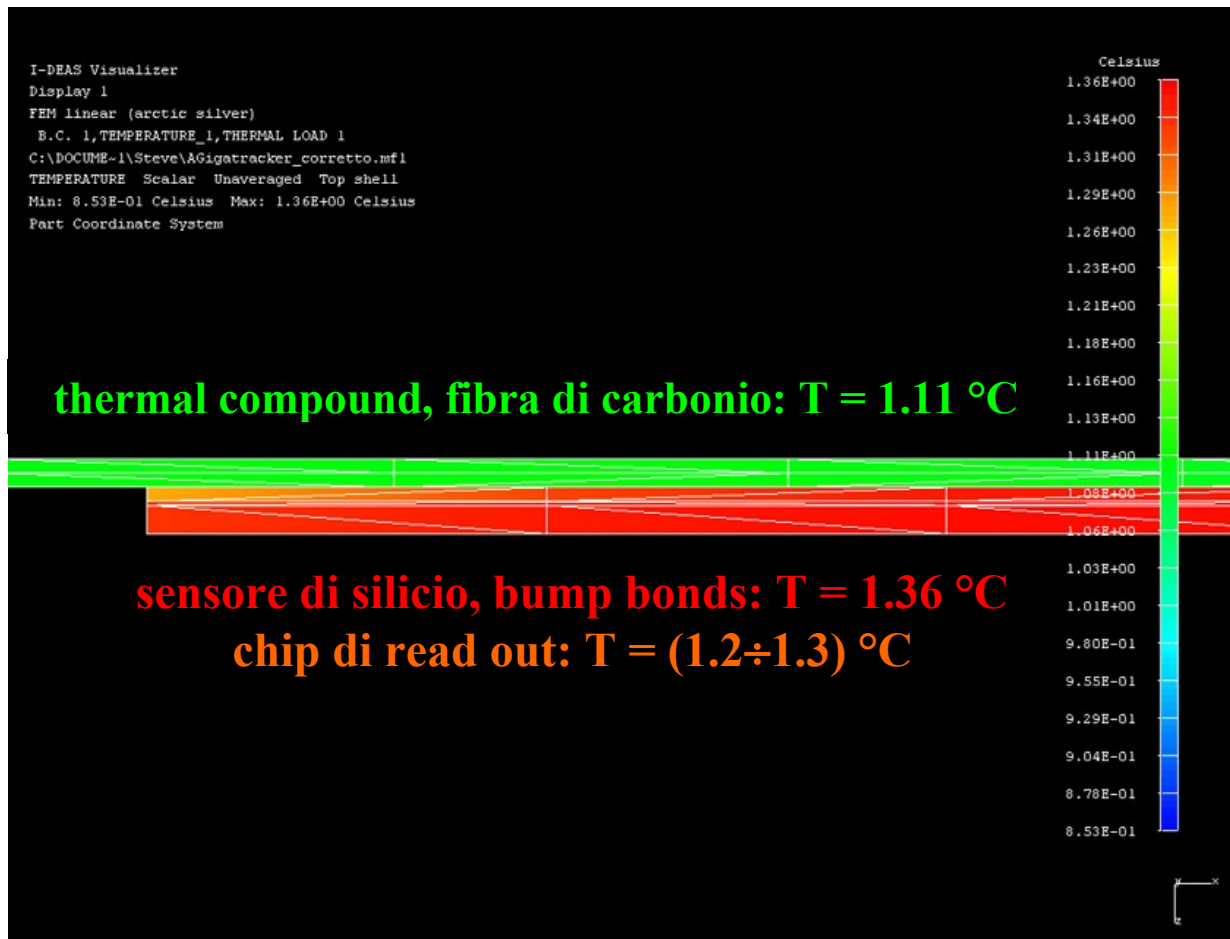


Figura 4.12: distribuzione di temperatura sulla parte laterale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Arctic Silver.

In questo modo si riduce il rischio di surriscaldamento dei chip, visto che la corrispondente diminuzione delle temperature è dell'ordine della decina di gradi Celsius. La pasta termica è un fluido in sospensione ottenuto dal mescolamento di oli polisintetici avanzati che cooperano per garantire la

sussistenza di tre fasi funzionali distinte. Appena estratto dal tubo, il fluido presenta una consistenza tale da permetterne una facile applicazione sulla superficie di utilizzo.

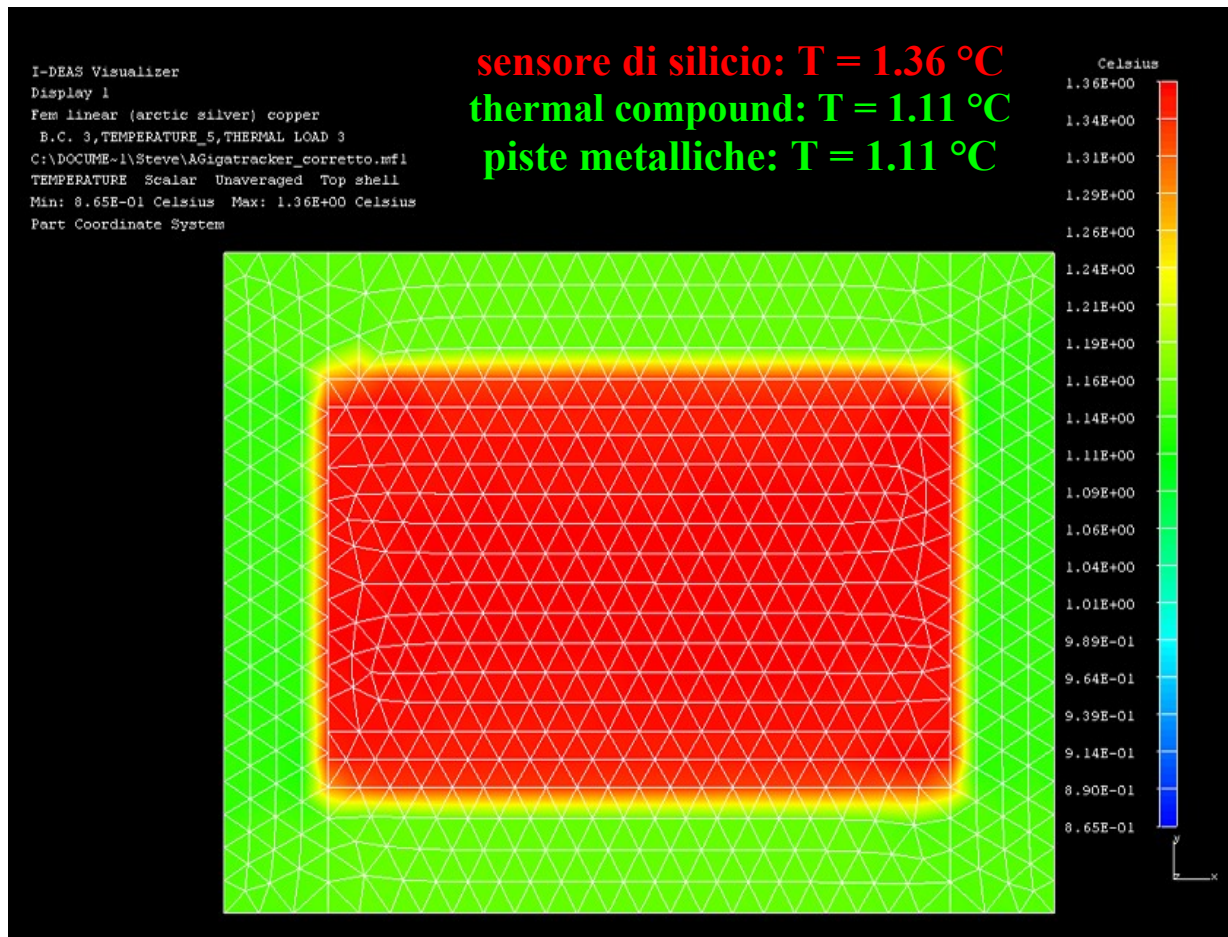


Figura 4.13: distribuzione di temperatura sulla parte frontale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Arctic Silver e in presenza delle piste metalliche laterali.

Dopodichè il fluido tende ad espandersi in modo da colmare bene tutti gli spazi, assicurando così il miglior contatto fisico possibile fra il chip e il dissipatore di calore.

Infine il composto si inspessisce leggermente nell'arco di alcune centinaia di ore per raggiungere la sua consistenza finale, la quale garantisce una stabilità a lungo termine.

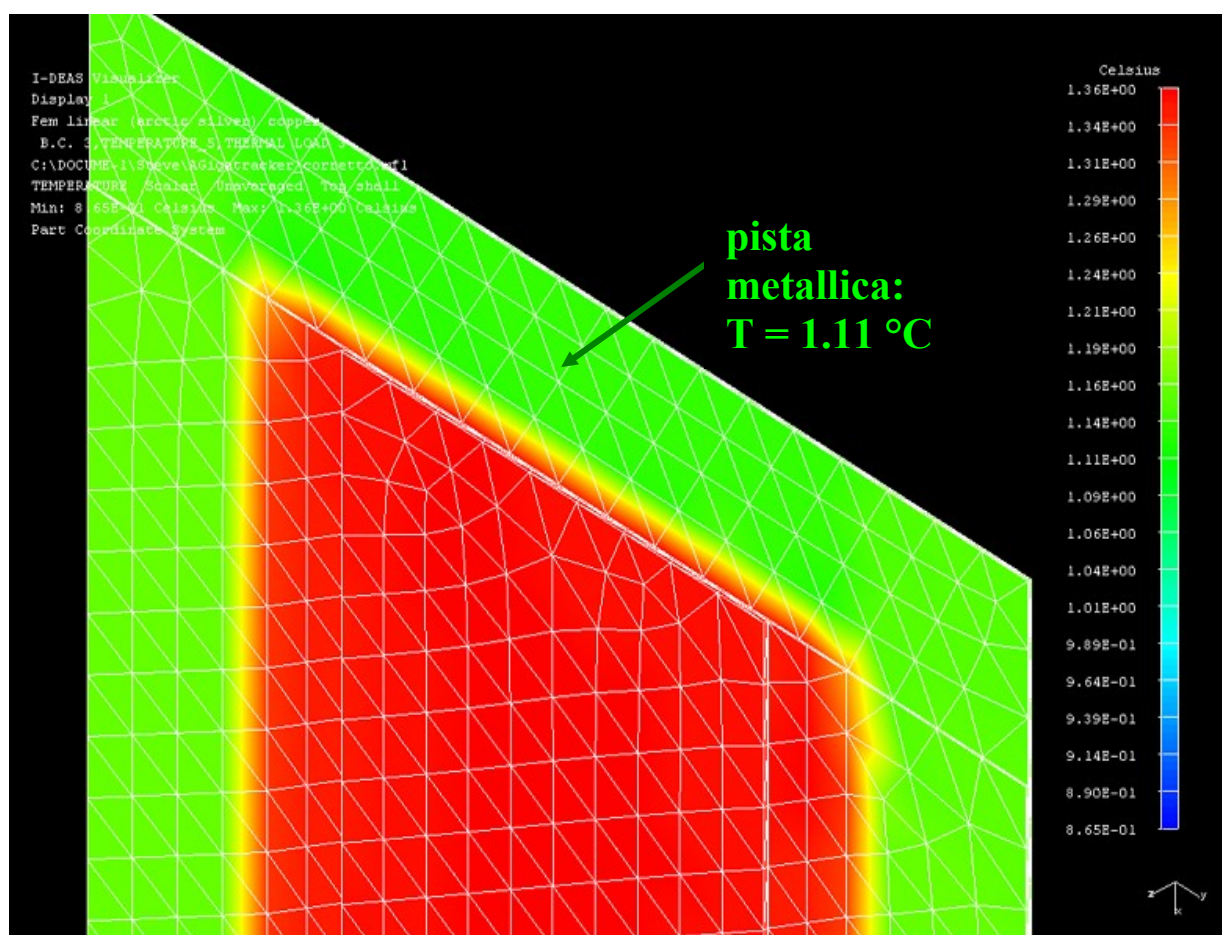


Figura 4.14: dettaglio della distribuzione di temperatura sulle piste metalliche, poste sulla parte frontale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Arctic Silver.

Rimane da precisare che l'Arctic Silver non è un conduttore elettrico, per cui esso non interferisce con i segnali. Il prodotto può essere utilizzato entro un esteso intervallo di temperature, che va dai -50°C fino ai 130°C.

Dall'osservazione delle figure alle pagine precedenti si può constatare come la distribuzione di temperatura sulle varie superfici del GigaTracker sia conforme alle esigenze di progetto, in quanto si riesce a stare ben al di sotto dei 5°C massimi ammissibili.

Inoltre le distribuzioni risultano sempre pressoché uniformi su ogni superficie, senza dare luogo a gradienti di temperatura, se non nel caso del passaggio fra volumi adiacenti: in tal caso le differenze di temperatura si attestano intorno ai decimi di grado Celsius.

La temperatura sul sensore in silicio e sui bump bonds ad esso sottostanti vale 1.36°C mentre il thermal compound, la cornice in fibra di carbonio, e le piste metalliche laterali si trovano tutti alla medesima temperatura di 1.11°C.

I chip di read out sono soggetti ad una temperatura intermedia, compresa fra 1.2 e 1.3 gradi Celsius e, come si può osservare nella visuale laterale in figura 4.12, la maggiore temperatura si registra al centro mentre le zone periferiche sono soggette ad una temperatura leggermente inferiore. Dalle simulazioni effettuate si evince che il comportamento termico del GigaTracker non subisce cambiamenti degni di nota, se si montano o meno le piste metalliche, sia nel caso in cui esse siano fatte in rame che nel caso in cui siano fatte in oro.

4.9.2 Risultati ottenuti con Akasa AK TC 5022

Nel seguito si fa riferimento all'uso del composto termico Akasa AK TC 5022; si tratta di una pasta termica fatta in silicone: la sua conducibilità termica vale $\lambda = 4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Questo composto termico è caratterizzato da una bassa resistenza termica, quindi permette un elevato trasferimento di calore dai chip di read out.

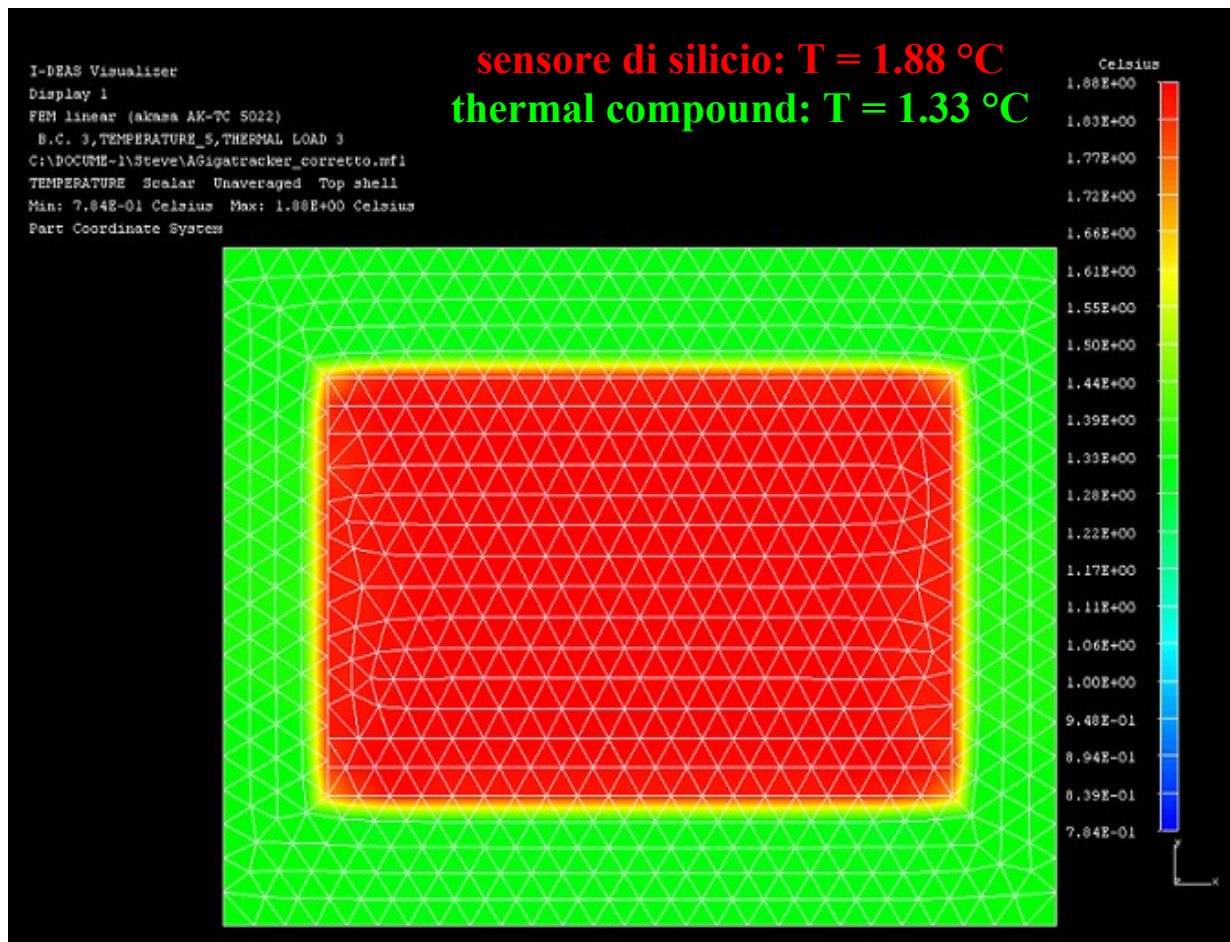


Figura 4.15: distribuzione di temperatura sulla parte frontale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Akasa AK TC 5022.

Questa pasta termica è particolarmente indicata per colmare bene lo spazio fra un chip ed il telaio che funge da dissipatore di calore, in modo da migliorare significativamente il trasferimento di calore fra le superfici poste a contatto. L'Akasa AK TC 5022 è una pasta termica ad elevate

prestazioni: infatti la sua elevata conduttività termica contribuisce al raffreddamento dei chip con cui è posta a contatto.

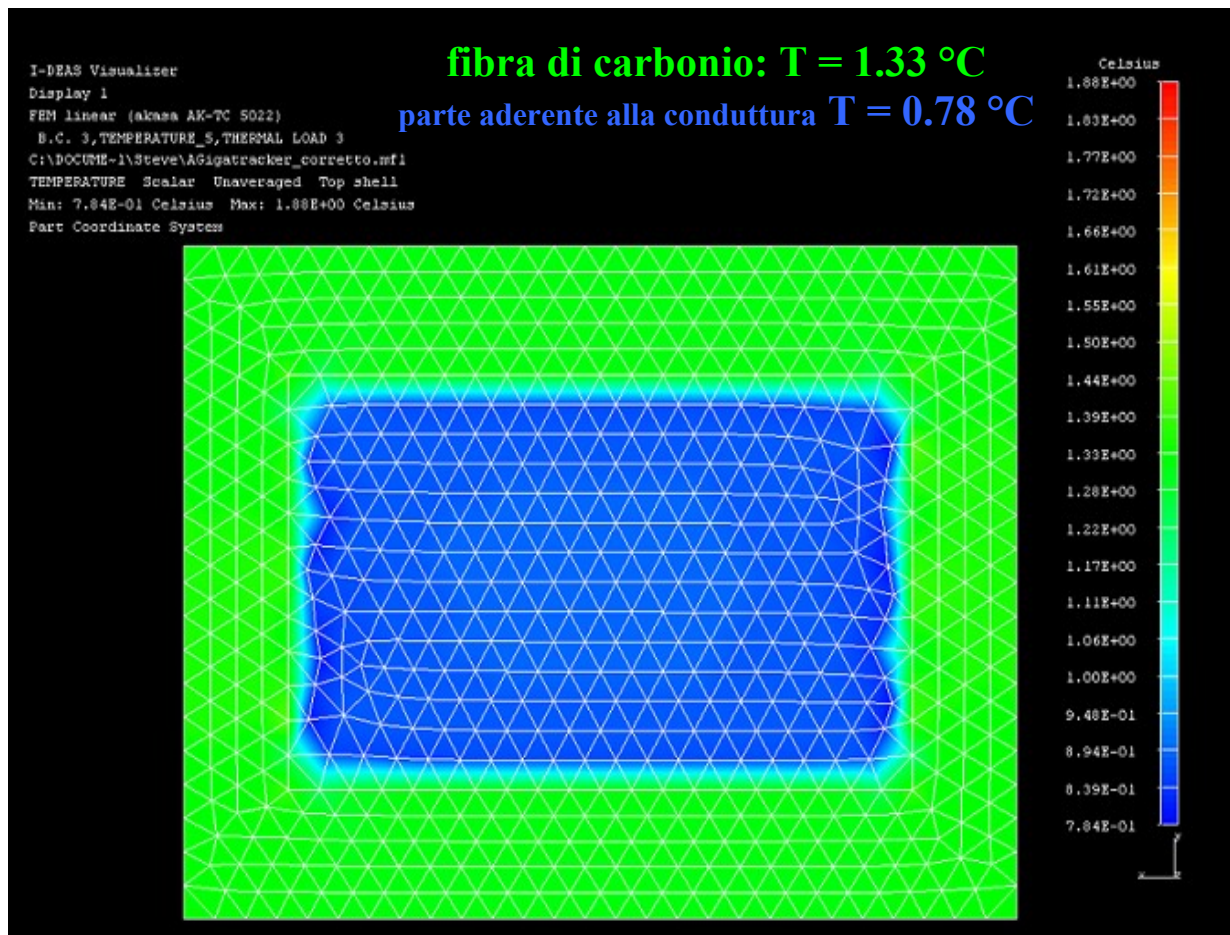


Figura 4.16: distribuzione di temperatura sulla parte posteriore del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Akasa AK TC 5022.

Tipicamente viene usata per favorire il trasferimento del calore generato da un microprocessore ad un telaio; inoltre il comportamento di questo composto termico non è dipendente dalla pressione a cui risulta soggetto: infatti le prestazioni rimangono ottimali anche nel caso di un ambiente

operativo caratterizzato da bassi valori di pressione, in particolare anche la sua resistenza termica rimane bassa.

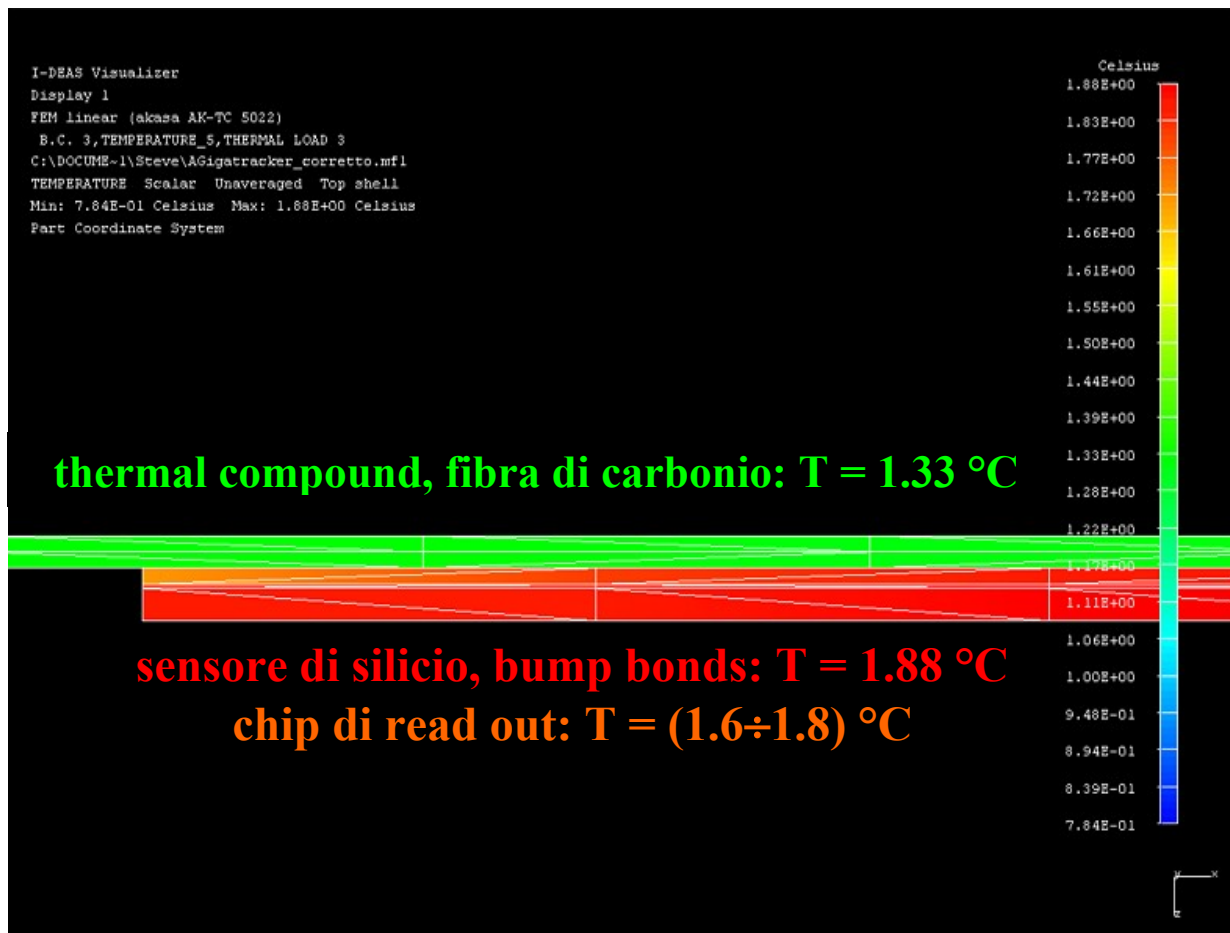


Figura 4.17: distribuzione di temperatura sulla parte laterale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Akasa AK TC 5022.

Il prodotto può essere applicato agevolmente sulle superfici e può operare entro un esteso intervallo di temperature che va dai -45°C fino ai 200°C. Dall'osservazione delle figure alle pagine precedenti si può constatare come, anche in questo caso, la distribuzione di temperatura sulle varie

superfici del GigaTracker sia conforme alle esigenze di progetto: si può verificare che si riesce a stare ben al di sotto dei 5°C massimi ammissibili.

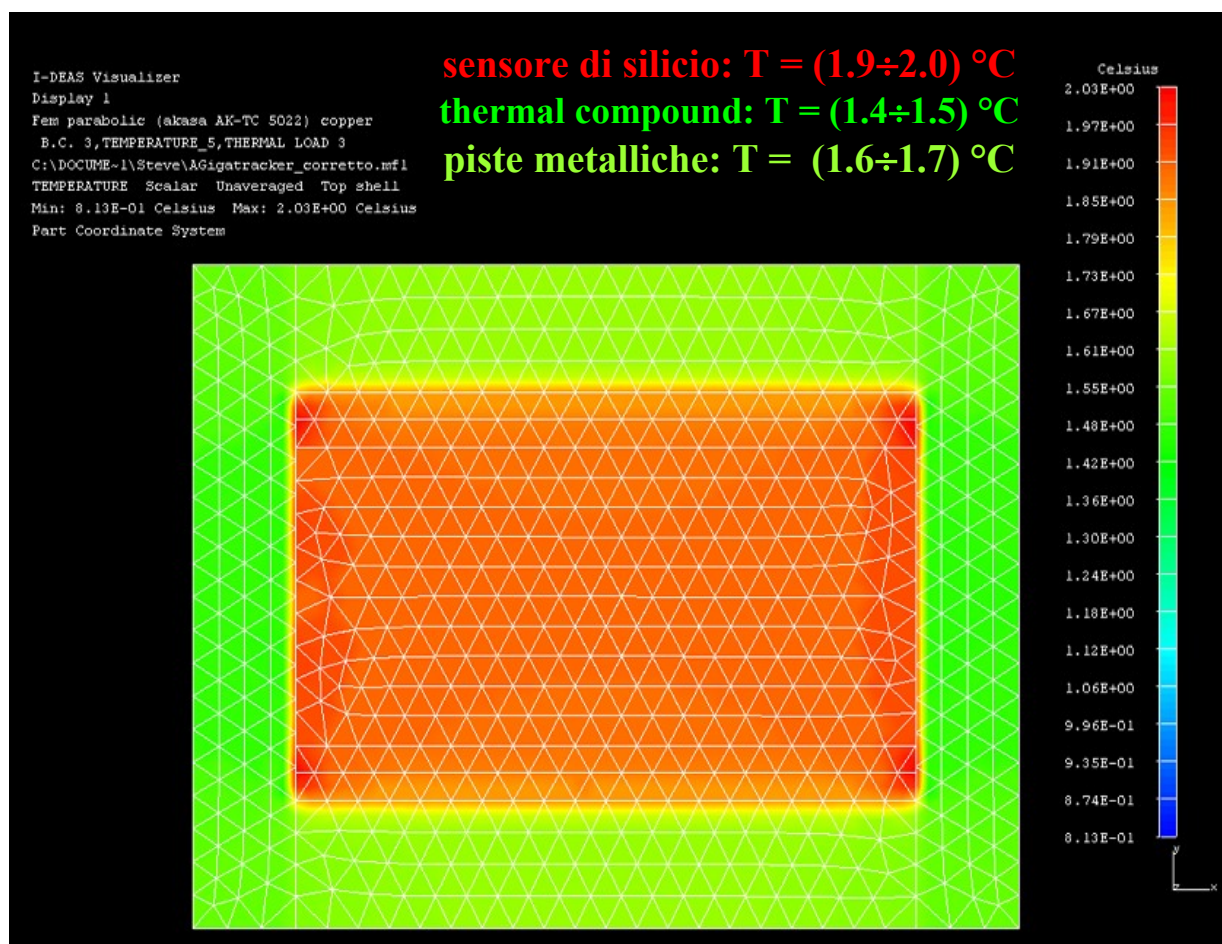


Figura 4.18: distribuzione di temperatura sulla parte frontale del GigaTracker, nel caso dell'utilizzo del composto termico Akasa AK TC 5022 e in presenza delle piste metalliche laterali.

Analogamente a quanto trattato al paragrafo precedente, relativamente all'uso dell'Arctic Silver, anche nel presente caso di utilizzo del composto Akasa AK TC 5022 si ottengono delle distribuzioni di temperatura pressoché uniformi su ogni superficie, senza dare luogo a gradienti di

temperatura, se non nel caso del passaggio fra volumi adiacenti: in tal caso le differenze di temperatura si attestano nuovamente attorno ai decimi di grado Celsius.

La temperatura sul sensore in silicio e sui bump bonds ad esso sottostanti vale 1.88°C mentre il thermal compound e la cornice in fibra di carbonio si trovano alla medesima temperatura di 1.33°C . I chip di read out sono soggetti ad una temperatura intermedia, compresa fra 1.6 e 1.8 gradi Celsius e, come si può osservare nella visuale laterale in figura 4.17, la maggiore temperatura si registra al centro mentre le zone periferiche sono soggette ad una temperatura leggermente inferiore. Le piste metalliche laterali sono soggette ad una temperatura compresa fra 1.6 e 1.7 gradi Celsius. Dalle simulazioni effettuate si evince che il comportamento termico del GigaTracker subisce cambiamenti molto lievi, nel caso in cui si montino le piste metalliche, sia nel caso in cui esse siano fatte in rame che nel caso in cui siano fatte in oro.

4.10 Conduttura di flussaggio gas periferica

La soluzione alternativa per ottenere il raffreddamento del GigaTracker prevede l'utilizzo di una conduttura aderente ai lati del rivelatore: in essa si fa scorrere l'azoto gassoso alla temperatura di ingresso $T_i = -173^{\circ}\text{C}$. Questa soluzione si avvale di una conduttura sottile, dunque la superficie totale del rivelatore che risulta interessata dallo scambio termico è assai ridotta rispetto ai casi di cui ci si è occupati al paragrafo precedente: come visibile alla figura della pagina seguente, la conduttura (in arancione) in cui flussa l'azoto gassoso aderisce ai lati del rivelatore in silicio

(evidenziata in verde); nella stessa figura è evidente la parte relativa a thermal compound (evidenziata in blu) e relativo supporto meccanico.

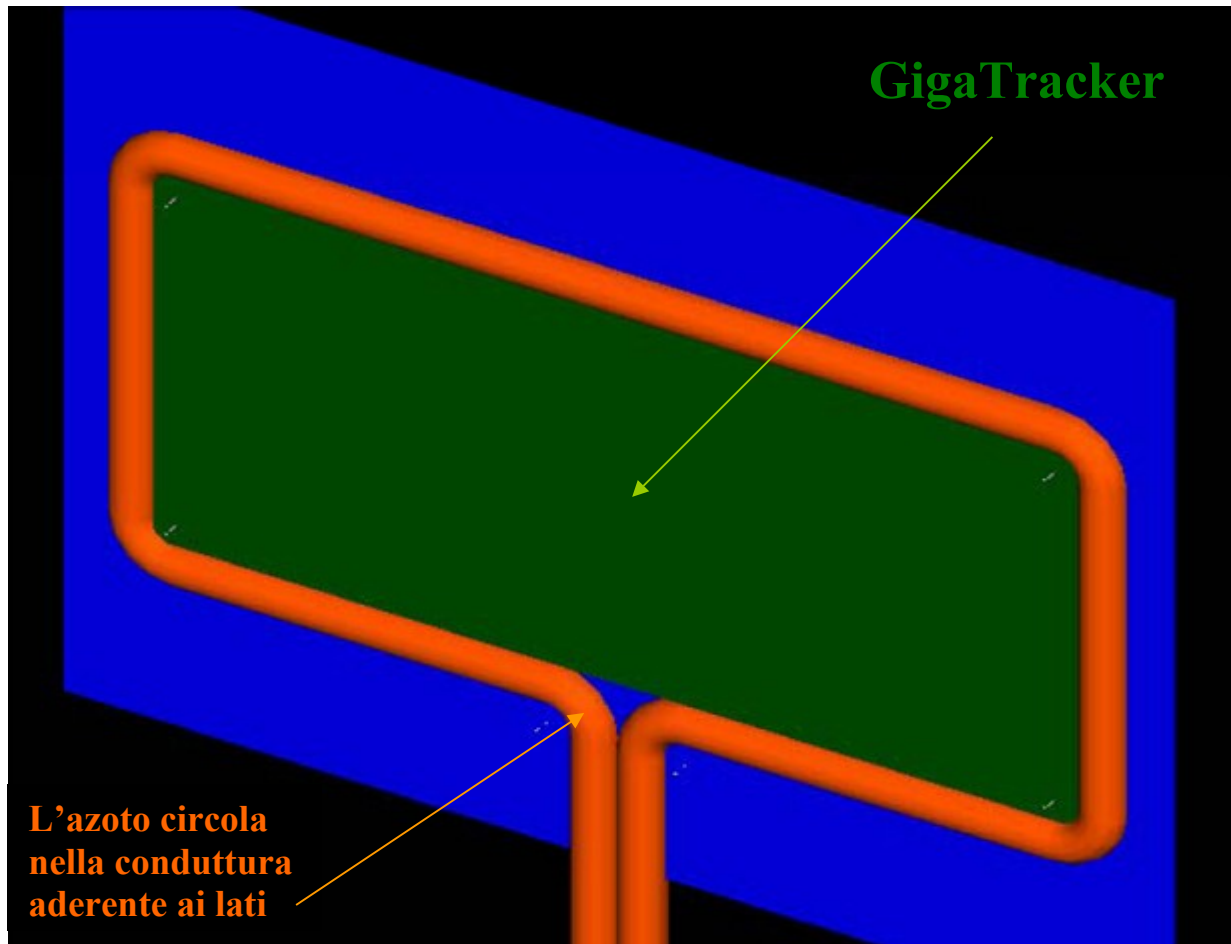


Figura 4.19: conduttura aderente ai lati del GigaTracker.

Dall'analisi termica effettuata si ricava una distribuzione di temperatura tutt'altro che uniforme, con notevoli sbalzi di temperatura sia nell'ambito di superfici singole che nel passaggio fra superfici distinte. Dall'osservazione della figura seguente si evince infatti che il sensore di silicio risulta soggetto ad una distribuzione di temperatura disomogenea,

compresa fra la temperatura minima $T_{\text{MIN}} = -15^{\circ}\text{C}$ e la temperatura massima $T_{\text{MAX}} = 3.5^{\circ}\text{C}$.

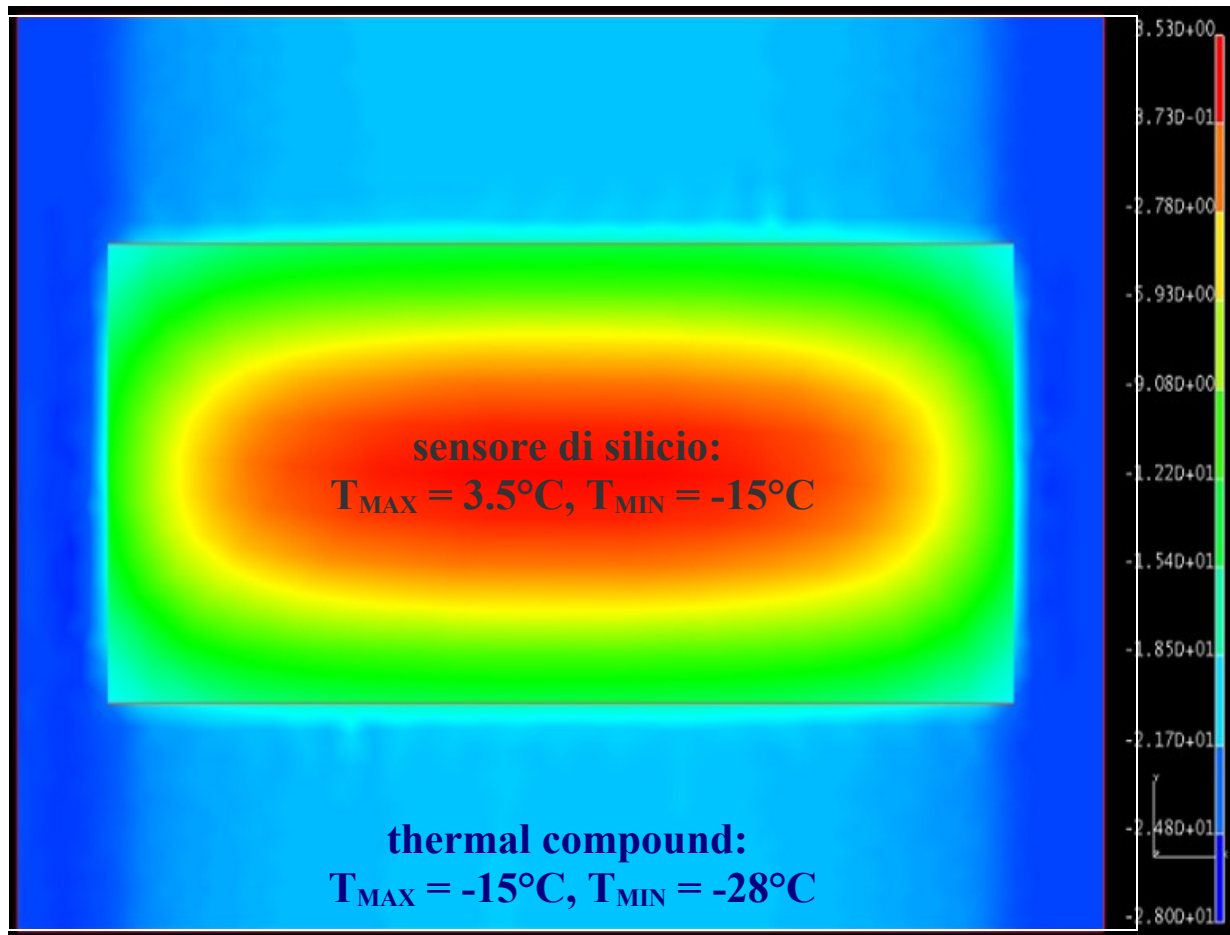


Figura 4.20: distribuzione di temperatura sulla parte frontale del Gigatracker, nel caso di utilizzo della conduttura aderente ai lati.

Naturalmente la temperatura minima si registra presso i lati del rivelatore in silicio, posti direttamente a contatto con la conduttura; dopodiché si registra un gradiente termico in salita man mano che ci si allontana dalle zone laterali per avvicinarsi alla zona centrale del rivelatore in silicio, ove si registra la temperatura massima in corrispondenza alla massima distanza

dalla conduttura laterale. Si ricava uno sbalzo termico non trascurabile, pari a $\Delta T = T_{MAX} - T_{MIN} = 18.5^{\circ}C$. Simili considerazioni possono essere fatte per il thermal compound: in esso si registra la temperatura minima $T_{MIN} = -28^{\circ}C$ e la temperatura massima $T_{MAX} = -15^{\circ}C$. Lo sbalzo termico vale $\Delta T = T_{MAX} - T_{MIN} = 13^{\circ}C$, quindi è anch'esso non trascurabile.

In conclusione questa soluzione che prevede l'utilizzo di una conduttura aderente ai lati del GigaTracker fornisce risultati poco incoraggianti: infatti le distribuzioni di temperatura sulle varie superfici sono disomogenee e si da luogo a notevoli gradienti di temperatura.

Sono dunque da preferire i casi precedentemente trattati in cui l'azoto gassoso circolava in una conduttura aderente al retro del GigaTracker: come visto, in tal caso si ottengono distribuzioni di temperatura omogenee sulle varie superfici oltreché trascurabili gradienti di temperatura.

4.11 Simulazione del GigaTracker

La soluzione ottimale per il modello termico prevede che l'azoto refrigerante circoli dentro un cilindro che contiene al suo interno il GigaTracker.

La stazione di rilevamento GigaTracker viene collegata per mezzo di wire bonds in rame ad un circuito stampato PCB (Printed Circuit Board) in fibra di vetro FR4, su cui scorrono le piste metalliche per l'invio dei segnali verso l'elettronica esterna.

Il circuito stampato ha la forma di una cornice quadrata di lato 100mm e spessore di 1.6mm, dotata di una finestra rettangolare delle dimensioni di 62mm x 39mm al cui interno si dispone il GigaTracker. Di conseguenza i

lati del foglio relativo ai chip di read out distano 1mm dai lati della finestra rettangolare del PCB.

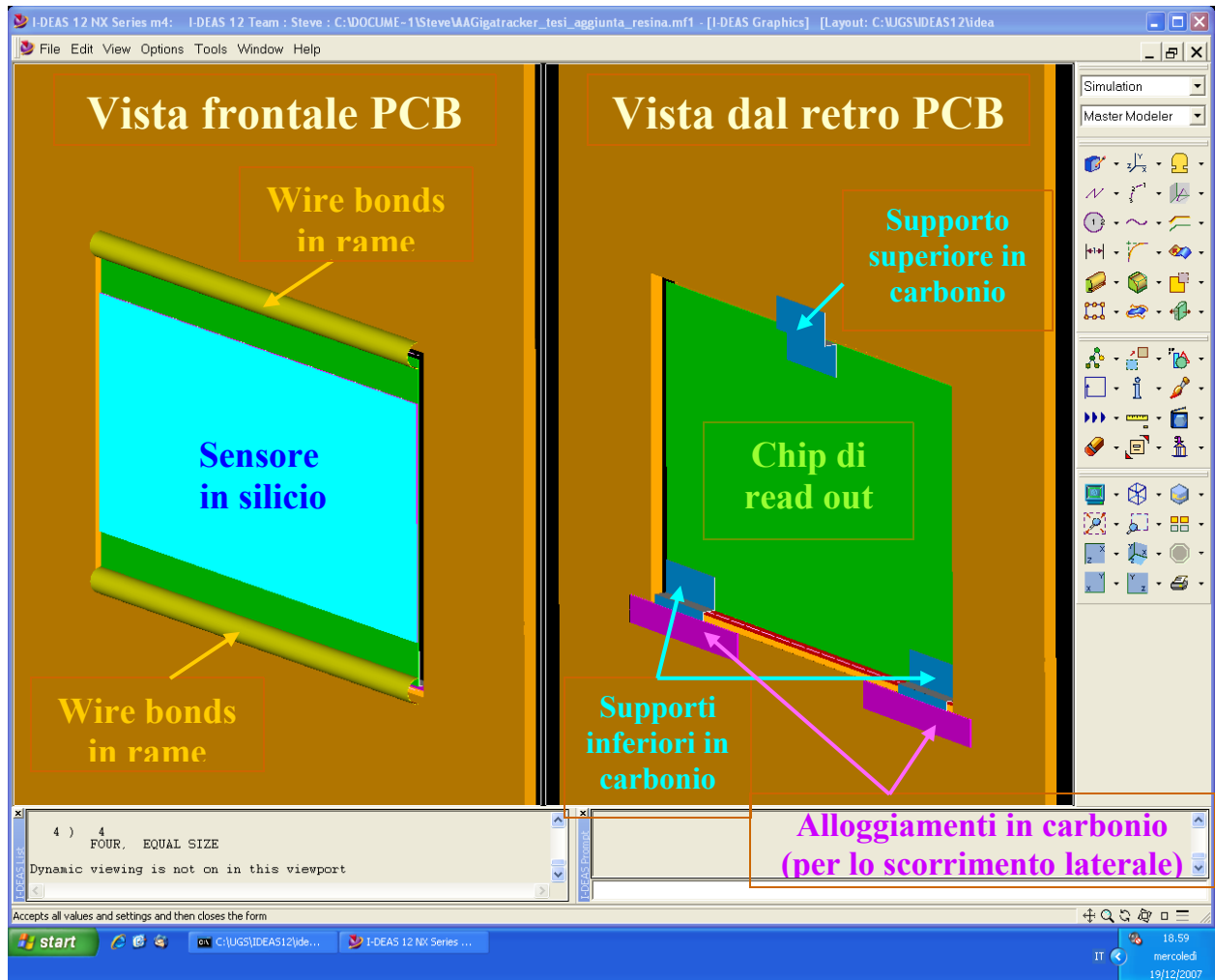


Figura 4.21: viste frontale e dal retro, relativamente al collegamento del GigaTracker al circuito stampato PCB. Nella figura di sinistra sono evidenti i wire bonds in rame (in verde chiaro) per il collegamento elettrico dai chip di read out (in verde) al PCB (in marrone chiaro). Nella figura di destra sono evidenti i supporti superiore ed inferiore in carbonio (in blu) per l'ancoraggio dei chip di read out (in verde) al PCB, in modo da vincolare il GigaTracker. I supporti inferiori sono posizionati in due alloggiamenti in carbonio (in viola) onde consentire lo scorrimento laterale in caso di deformazione termica lineare.

Come visibile alla figura della pagina precedente, l'ancoraggio meccanico del GigaTracker al PCB si ottiene con l'ausilio di tre supporti meccanici in carbonio, aderenti al retro del foglio dei chip di read out.

I supporti sono molto sottili, in quanto il loro spessore vale appena 100 micron; la loro base è di forma rettangolare, coi lati di 10mm x 4mm. Inoltre i due supporti inferiori non vengono direttamente saldati sulla scheda PCB ma bensì essi vengono inseriti in due alloggiamenti in carbonio, a loro volta saldati sulla superficie del circuito stampato PCB. La base inferiore di tali alloggiamenti è di forma rettangolare, coi lati di 22mm x 3.3mm e avente uno spessore di 100 micron; gli alloggiamenti presentano poi una cavità di spessore 100 micron, in cui si inserisce il relativo supporto. Naturalmente è poi presente una base superiore, di dimensioni identiche a quella inferiore. Si sono predisposti i due alloggiamenti suddetti allo scopo di permettere la dilatazione termica lineare del GigaTracker, che avrà inevitabilmente luogo in conseguenza del calore generato; in particolare ci si riferisce qui alla dilatazione termica subita dal foglio dei chip di read out.

Nel seguito viene descritto dettagliatamente il progetto del supporto e del sistema di raffreddamento adottato in via definitiva; il suo scopo è quello di garantire una temperatura sul sensore sempre inferiore a $T_{MAX} = 5^{\circ}C$. Infatti sotto queste condizioni la vita media del rivelatore è di circa 100 giorni. Il sistema di raffreddamento adottato è stato ideato tenendo presente che sul fascio si deve usare una quantità di materiale minima, onde perturbarlo il meno possibile.

Il GigaTracker trova collocazione all'interno di un volume in cui fluisce gas di azoto refrigerante. Nella parte dove il fascio è incidente, il volume è definito da una sottile parete di Kapton di 50 micron. Per la sua

realizzazione pratica si opera come segue: si predispongono due semicilindri in Kapton a parete sottile sui due lati opposti del PCB.

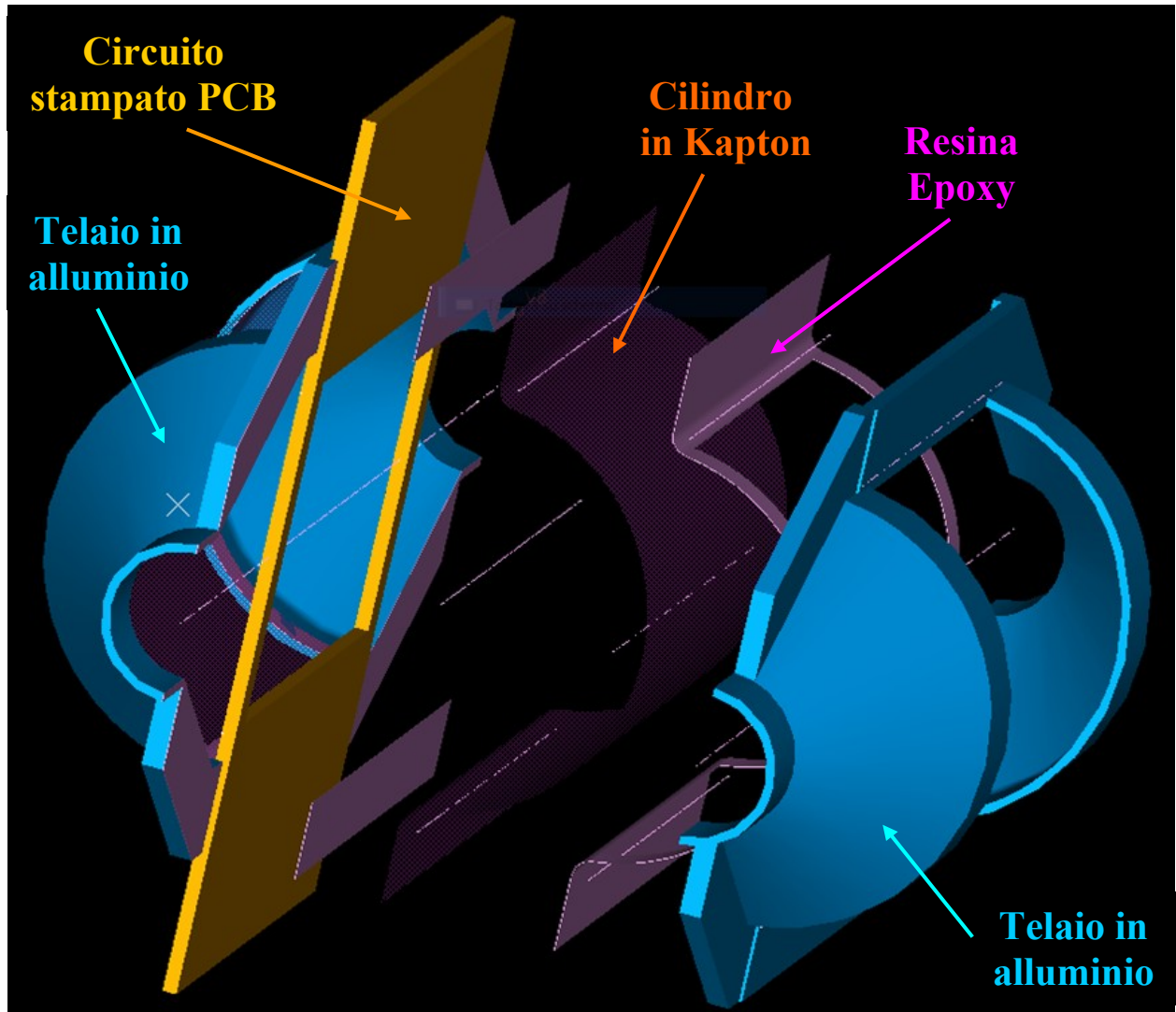


Figura 4.22: assemblaggio del sistema di raffreddamento. In arancione scuro è visibile la scheda PCB, su cui si incollano i due semitelai in alluminio (di colore blu); il loro incollaggio avviene per mezzo di una resina epossidica (evidenziata in viola scuro). Si devono montare poi i due semicilindri di Kapton (messi in semitrasparenza per non sovrapporsi al resto della figura): anch'essi devono venire incollati per mezzo della già citata resina epossidica al telaio in alluminio.

Il diametro interno dei due semicilindri vale 47mm mentre lo spessore è di soli 50 micron.

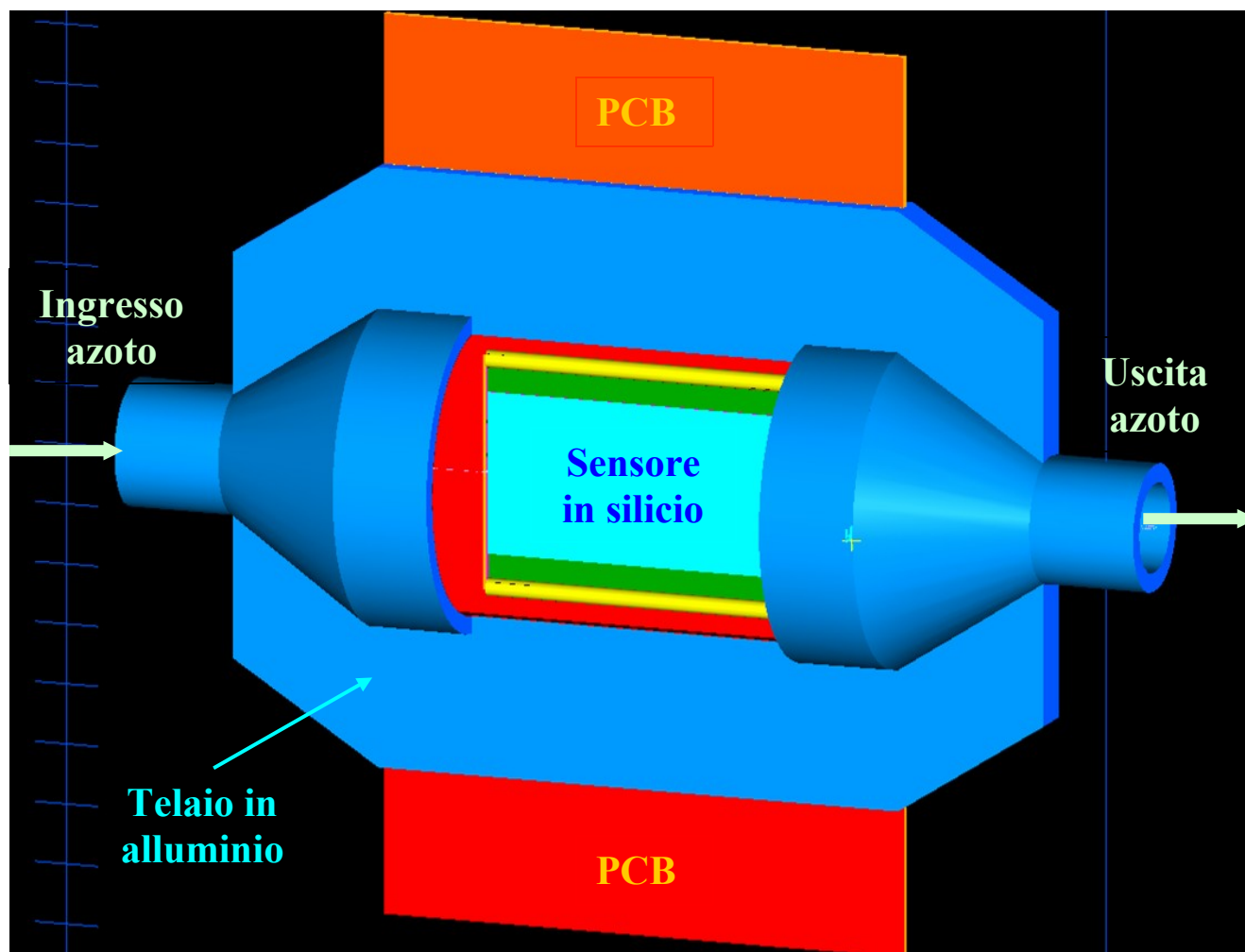


Figura 4.23: posizionamento del GigaTracker all'interno del cilindro; in rosso è parzialmente visibile il circuito stampato PCB mentre in blu è visibile il telaio in alluminio. Infine il cilindro in Kapton è stato reso trasparente in figura, in modo da rendere visibile all'osservatore il GigaTracker. L'azoto refrigerante viene veicolato nell'imboccatura di ingresso a sinistra per poi fuoriuscire dall'imboccatura di uscita a destra; durante il passaggio nel cilindro, l'azoto sottrae una considerevole quantità di calore dal GigaTracker, con l'effetto di raffreddarlo.

I due semicilindri in Kapton vengono incollati per mezzo di una resina Epoxy su un telaio in alluminio (Al) di spessore 3mm.

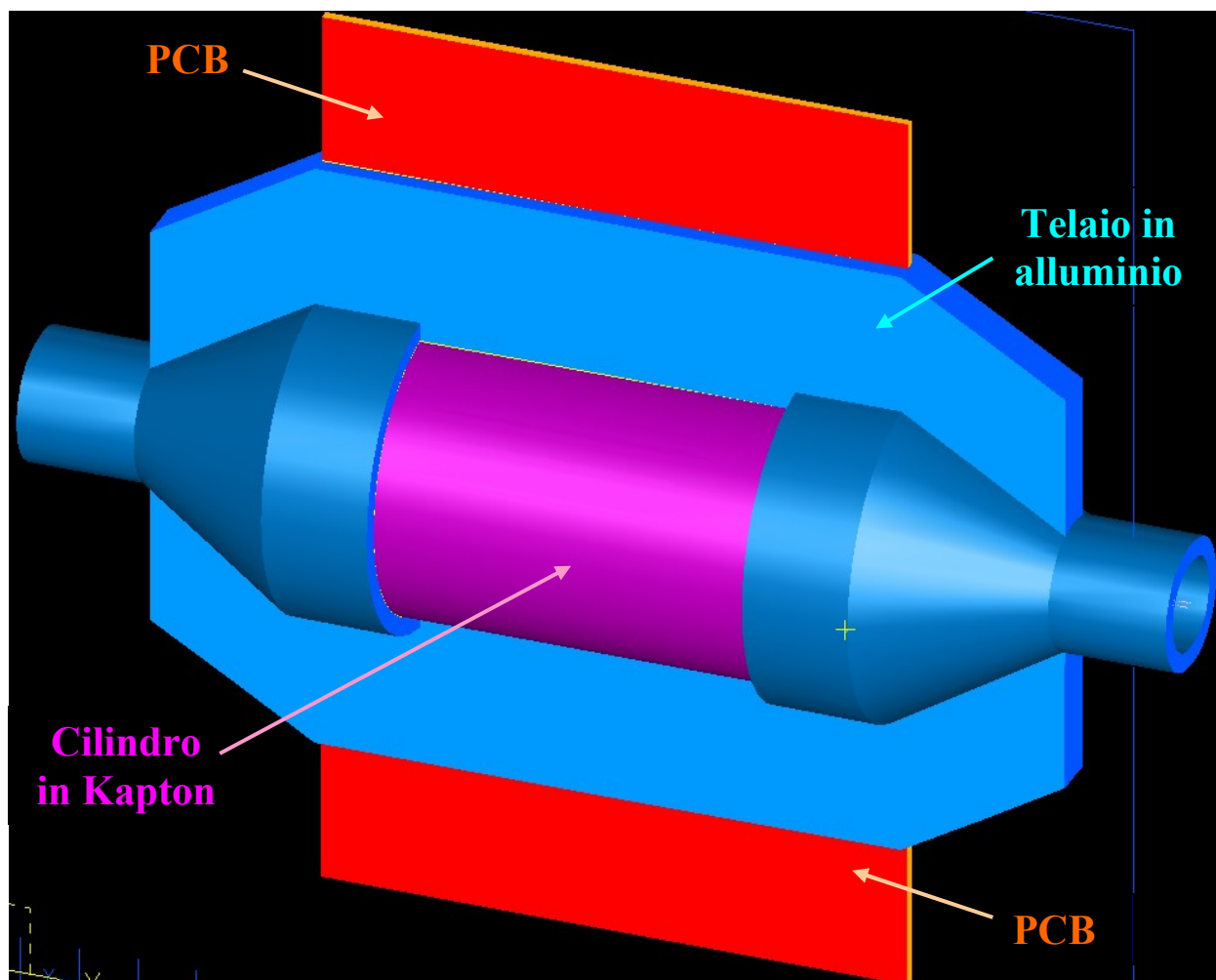


Figura 4.24: configurazione finale del sistema di raffreddamento; in rosso è parzialmente visibile il circuito stampato PCB, in blu è visibile il telaio in alluminio mentre in viola si intravede il cilindro in Kapton.

Nello specifico lo strato di resina applicato ha uno spessore di 100 micron. Il telaio in alluminio risulta a sua volta costituito da due semitelai disposti sui lati opposti del circuito stampato. I semitelai vengono incollati al PCB mediante l'uso della resina Epoxy.

Ambedue i semitelai hanno una lunghezza di 100mm ed uno spessore di 3mm; infine presentano entrambi una finestra, il cui lato ha una lunghezza di 62mm; si opera così al fine di evitare di porre una quantità eccessiva di materiale addizionale attraverso il fascio di particelle.

Proprietà dei materiali	Modulo di Young [Pa]	Coefficiente di Poisson	Densità di massa [Kg/m ³]	Modulo di taglio [Pa]	Coefficiente di dilatazione termica [K ⁻¹]	Conducibilità termica [W/(m*K)]
Alluminio (Al)	70*10 ⁹	0.35	2700	26*10 ⁹	23.1*10 ⁻⁶	235
Kapton Dupont	3.5*10 ⁹	0.34	1420	1.31*10 ⁹	20*10 ⁻⁶	0.155
Epoxy Fibra di vetro	4.3*10 ⁹	0.34	1265	1.6*10 ⁹	40.9*10 ⁻⁶	0.188
	45*10 ⁹	0.28	2076	17.6*10 ⁹	6.7*10 ⁻⁶	0.83
Acciaio	210*10 ⁹	0.3	7960	80.8*10 ⁹	16*10 ⁻⁶	16.3
Rame modificato	130*10 ⁹	0.34	8920	48*10 ⁹	16.5*10 ⁻⁶	133

Tabella 4.2: ulteriori materiali usati nel GigaTracker; in questa sede si specificano solamente i valori delle grandezze fisiche necessarie per compiere le analisi termiche e termo-elastiche.

In tal modo il fascio deve attraversare soltanto lo spessore addizionale relativo ai due semicilindri di Kapton (quindi lo spessore totale di Kapton

da attraversare vale appena 100 micron). Infine il telaio in alluminio subisce un opportuno restringimento alle estremità per consentirne il collegamento ai tubi che veicolano l'azoto gassoso in ingresso e in uscita al cilindro.

4.12 Analisi termica della configurazione

Al fine di effettuare l'analisi termica del sistema di raffreddamento bisogna realizzare innanzitutto un modello ad elementi finiti FEM (Finite Element Model) relativo al GigaTracker, al supporto e al cilindro. Per fare ciò se ne partizionano opportunamente i volumi tramite un algoritmo di meshatura: nel presente caso si utilizzano tetraedri parabolici con dimensione caratteristica (element length) pari a 3mm; si assegna poi a ciascun volume il relativo materiale.

L'azoto refrigerante viene introdotto in ingresso ad una estremità del cilindro alla temperatura di ingresso $T_i = -173^\circ\text{C}$; esso fluisce nel cilindro e sottrae calore dal GigaTracker, riuscendo in tal modo a raffreddarlo. Per finire, l'azoto fuoriesce dall'altra estremità del cilindro: naturalmente la temperatura di emissione dell'azoto risulterà più elevata rispetto a quella di immissione, a causa del calore sottratto dal GigaTracker.

Per ricavare la distribuzione di temperatura si opera con il modello ad elementi finiti precedentemente ricavato. L'analisi termica richiede di specificare il seguente carico termico (thermal load): esso comprende innanzitutto il flusso di calore (heat flux) di $2\text{W}/\text{cm}^2$ sulla superficie attiva dei chip di read out, la cui estensione vale $S_{\text{TOT}} = 16.2\text{cm}^2$; esso comprende inoltre lo scambio termico per convezione con l'azoto refrigerante su tutte

le superfici interne: infatti la convezione con l'azoto gassoso interessa ciascuna superficie esposta.

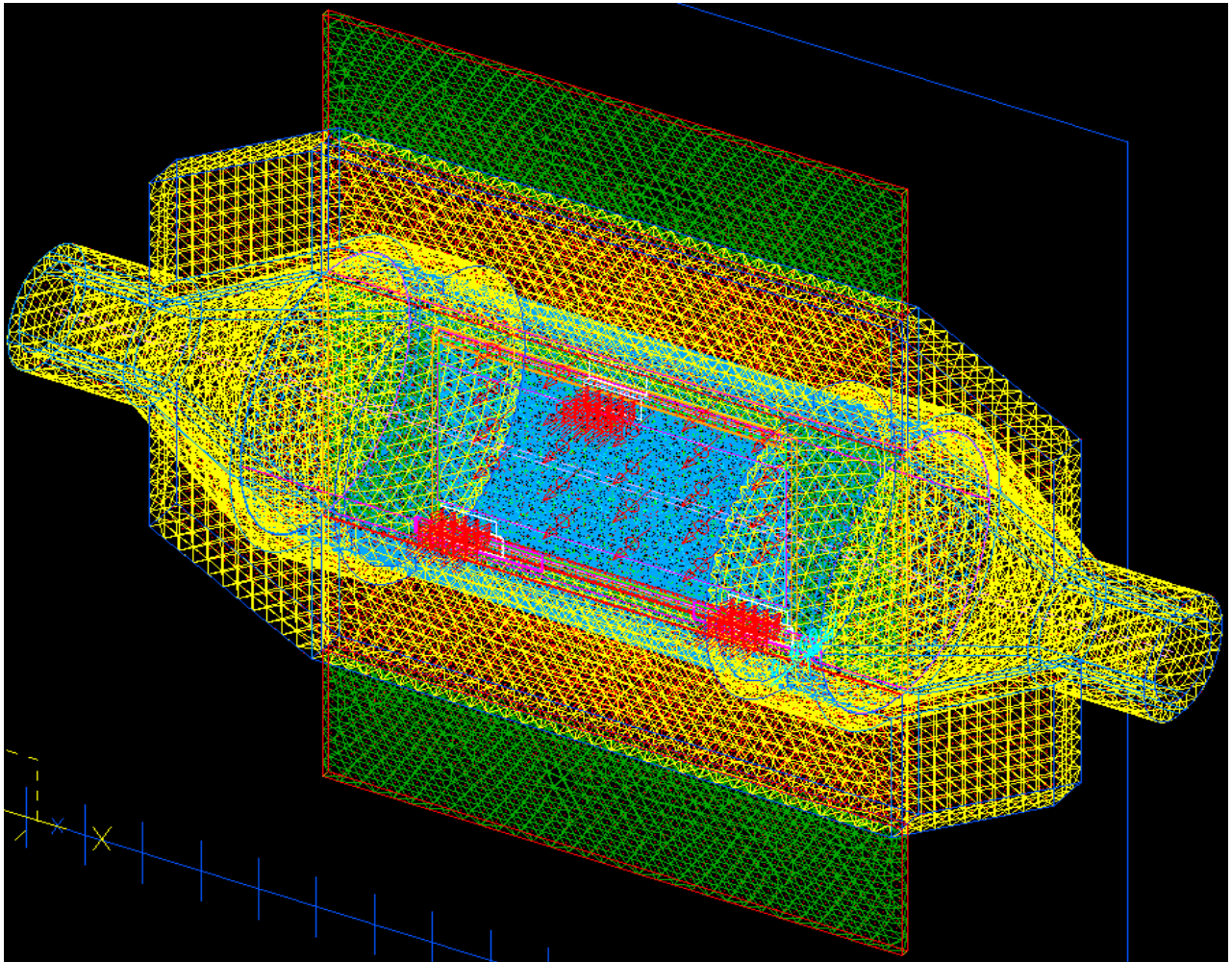


Figura 4.25: modello ad elementi finiti della configurazione con il GigaTracker all'interno del cilindro. E' evidente la partizione dei volumi secondo un tessuto (mesh) di tetraedri parabolici.

Si devono quindi selezionare tutte queste superfici e specificare la temperatura di ingresso del gas, pari a $T_i = -173^{\circ}\text{C}$; inoltre si deve

specificare il coefficiente di convezione opportuno. Dopo numerosi tentativi si è trovato il valore seguente $\alpha = 48\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

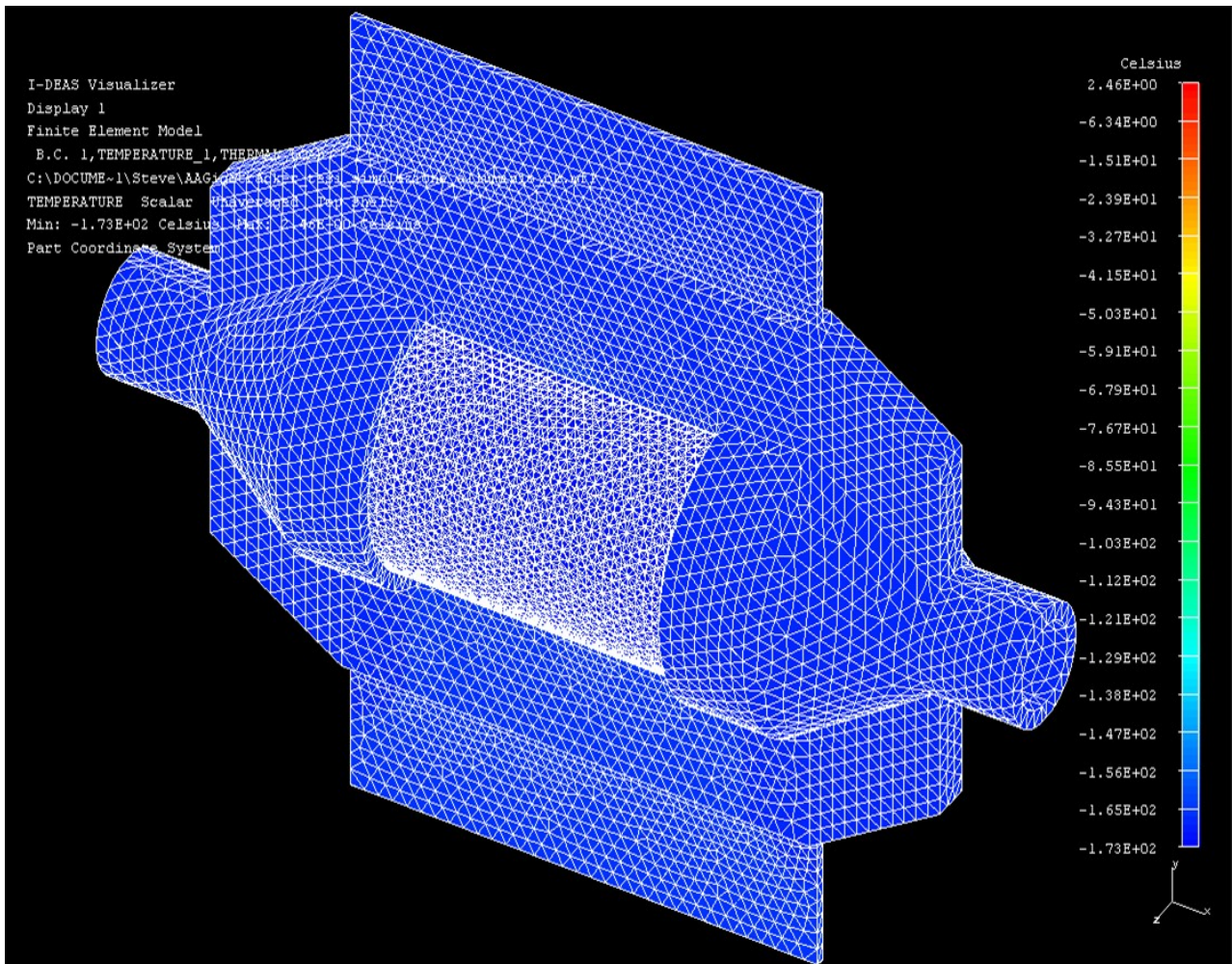


Figura 4.26: distribuzione di temperatura ricavata relativamente alla configurazione con il GigaTracker all'interno del cilindro. La massima temperatura riscontrata è di circa 2.5°C .

Il processo di risoluzione del modello porta alla generazione di una mappa di distribuzione delle temperature, di cui viene mostrata nel seguito una

sezione trasversale: in tal modo si rende visibile all'osservatore la distribuzione termica registrata sulla superficie del rivelatore in silicio.

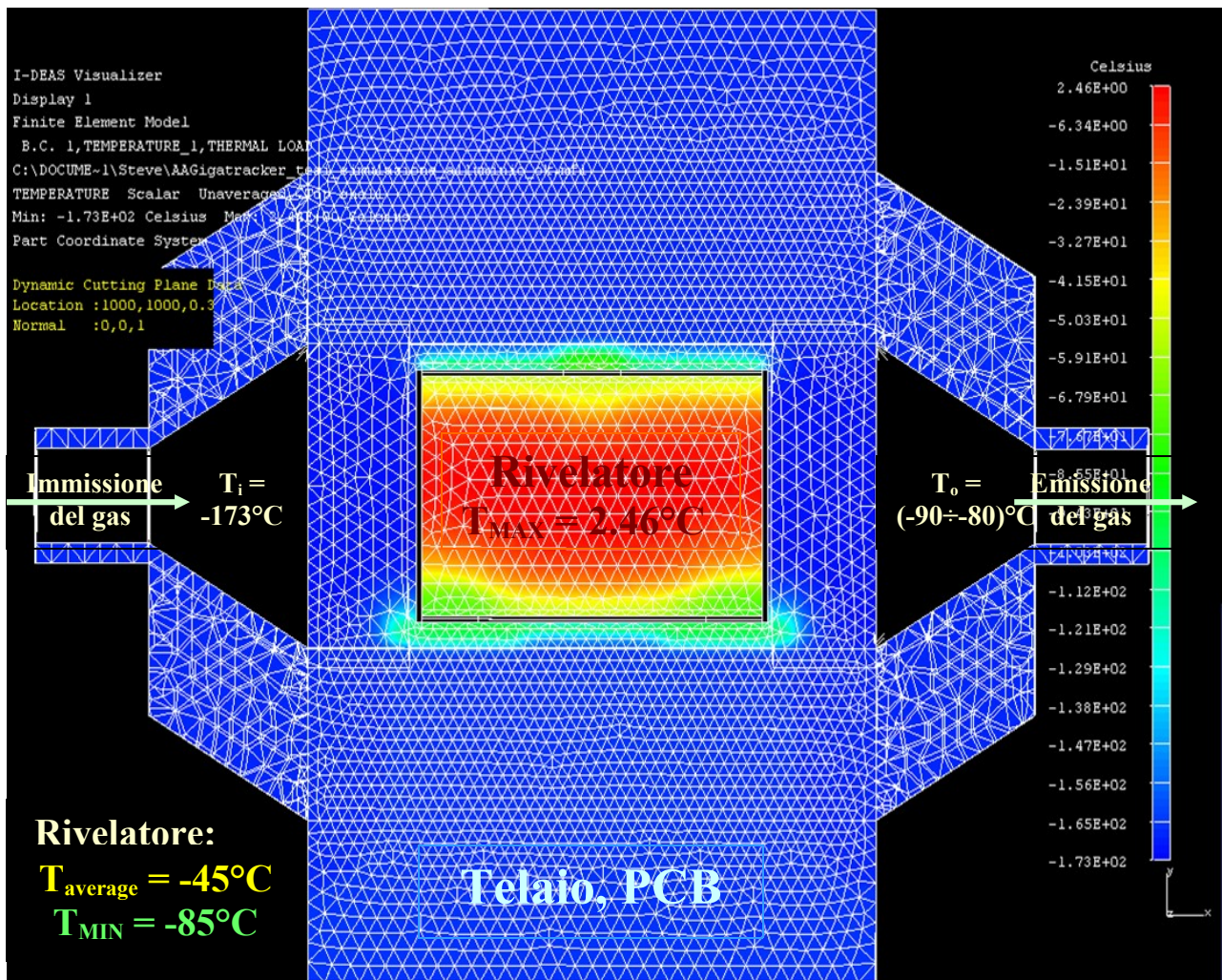


Figura 4.27: distribuzione di temperatura su una sezione trasversale; è evidente la partizione in tetraedri parabolici. Sulla superficie del rivelatore in silicio si registra la temperatura massima $T_{\text{MAX}} = 2.46^\circ\text{C}$ (superficie in rosso) e la temperatura minima $T_{\text{MIN}} = -85^\circ\text{C}$ (superficie in verde) in prossimità dei tre supporti in carbonio. Sul rivelatore si registra anche una temperatura intermedia $T_{\text{average}} = -45^\circ\text{C}$ (nelle zone evidenziate in giallo).

Nella figura mostrata alla pagina precedente è particolarmente evidente la partizione del modello in un tessuto (mesh) di tetraedri parabolici; nella fattispecie si è scelto di utilizzare i tetraedri parabolici, in quanto quelli lineari sono troppo rigidi e quindi condurrebbero ad una sottostima dello stato pensionale della struttura sotto sforzo.

Come visibile nell'immagine, il GigaTracker risulta soggetto ad una distribuzione di temperatura il cui valore più elevato è di 2.46°C : dunque la temperatura si mantiene sempre al di sotto di $T_{\text{max}} = 5^{\circ}\text{C}$, come da specifica di progetto.

In particolare la sezione rappresentata permette di osservare la distribuzione di temperatura ottenuta sulla superficie del rivelatore in silicio: la temperatura massima ivi registrata vale $T_{\text{MAX}} = 2.46^{\circ}\text{C}$; essa viene riscontrata nella zona centrale del rivelatore. Si può notare come la superficie di colore rosso risulti soggetta ad un range di temperature che spazia dai -20°C ai circa 2.5°C .

Spostandosi verso il limite periferico della superficie in rosso si raggiunge una zona transitoria evidenziata in arancione e giallo, su cui si misura la temperatura intermedia $T_{\text{average}} = -45^{\circ}\text{C}$; si tratta di una zona interessata da un repentino abbassamento della temperatura, la quale varia infatti da un valore inferiore di -50°C ad un valore superiore di -20°C .

Infine la temperatura minima registrata sul rivelatore vale $T_{\text{MIN}} = -85^{\circ}\text{C}$ e viene riscontrata in prossimità dei tre supporti in carbonio; la superficie di colore verde è interessata da un range di temperatura che spazia dai -110°C fino ai -50°C circa. Infine il cilindro e il telaio sono soggetti a temperature ancora inferiori, dell'ordine di grandezza dei -130°C . L'azoto refrigerante viene immesso nel cilindro alla temperatura di ingresso $T_i = -173^{\circ}\text{C}$; il gas estrae calore dal GigaTracker, raffreddandolo di conseguenza, e fuoriesce dal cilindro alla temperatura di uscita $T_o = (-90 \div -80)^{\circ}\text{C}$.

4.13 Costruzione del prototipo del GigaTracker e del sistema di raffreddamento

Presso l'officina meccanica della sezione di Ferrara dell'INFN è stato realizzato un prototipo del GigaTracker.

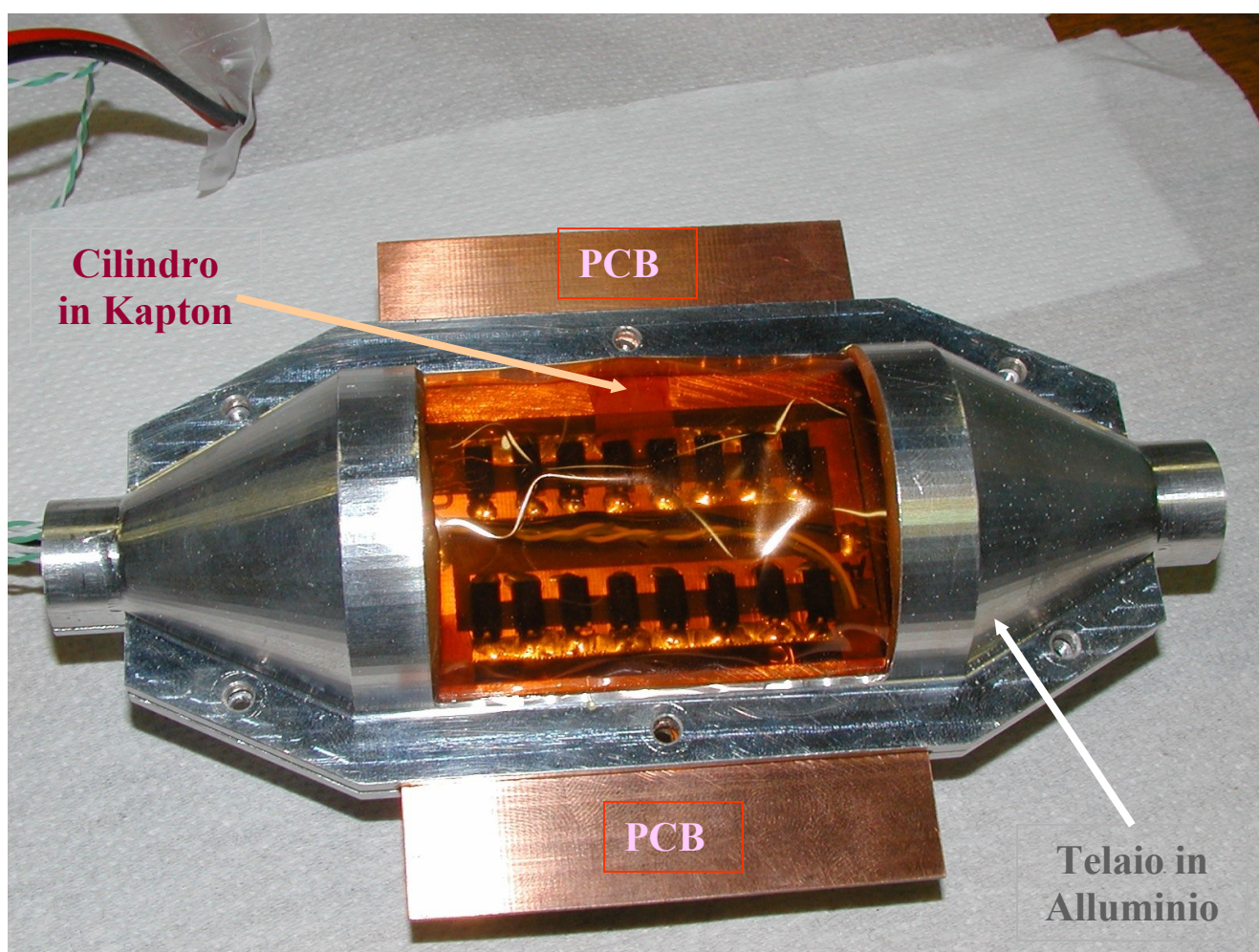


Figura 4.28: prototipo costruito in officina meccanica; il GigaTracker viene montato all'interno del volume delimitato dal cilindro in Kapton (di colore rosso trasparente). Nell'immagine sono anche evidenti il telaio in alluminio (in grigio) e le parti estreme della scheda PCB (in color rame).

Il prototipo è equivalente all'originale sia per quanto riguarda le sue proprietà meccaniche che per la sua generazione di potenza.

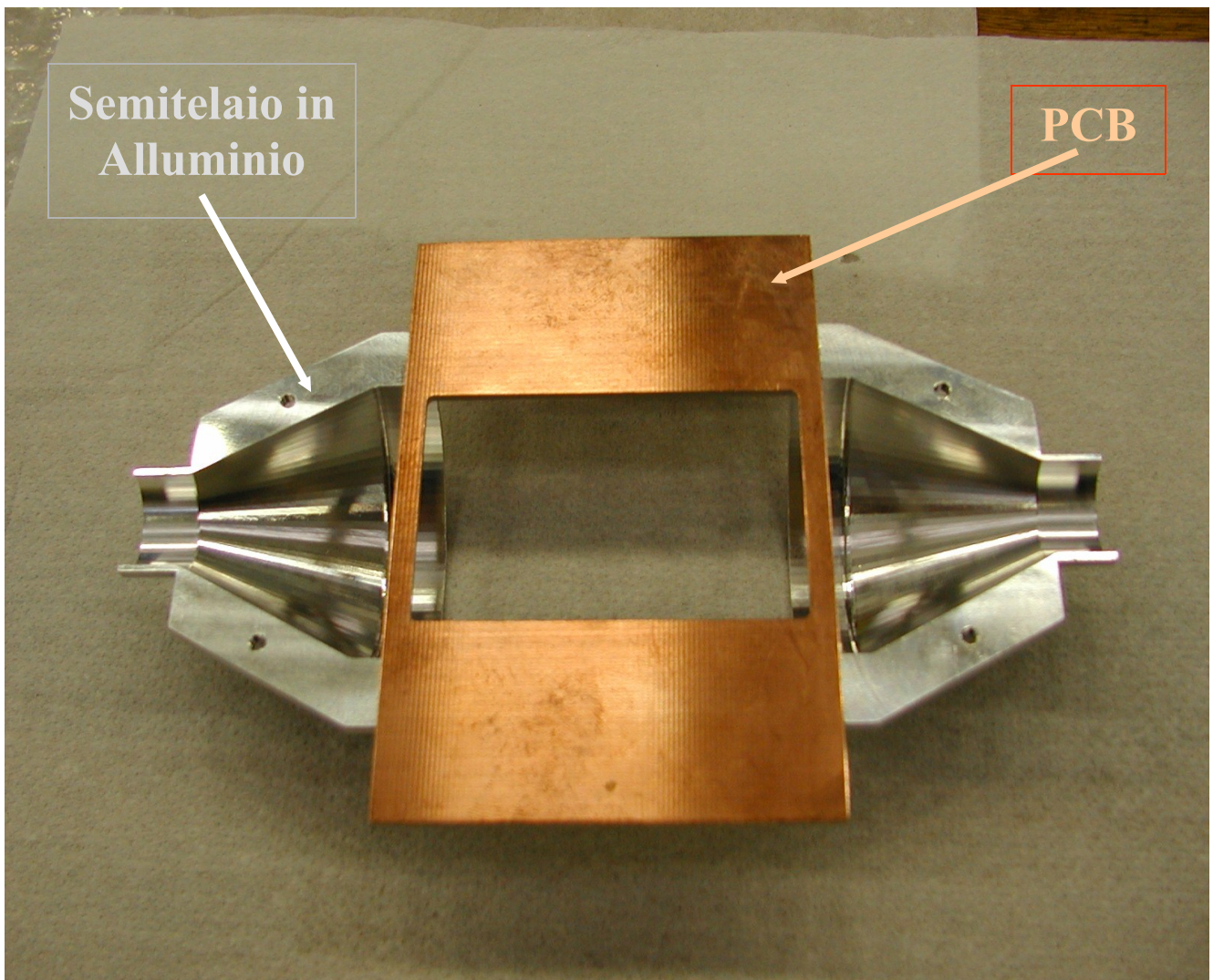


Figura 4.29: semitelaio in alluminio (in grigio) ed equivalente meccanico della scheda PCB (in color rame), all'interno della cui finestra rettangolare si deve montare il prototipo del GigaTracker.

Esso è stato costruito per poter testare sperimentalmente il comportamento meccanico e termico del GigaTracker.

Sul prototipo del GigaTracker vengono montati in parallelo sedici resistori di valore $R = 222\Omega$, con una potenza cadauno $P = 2W$.

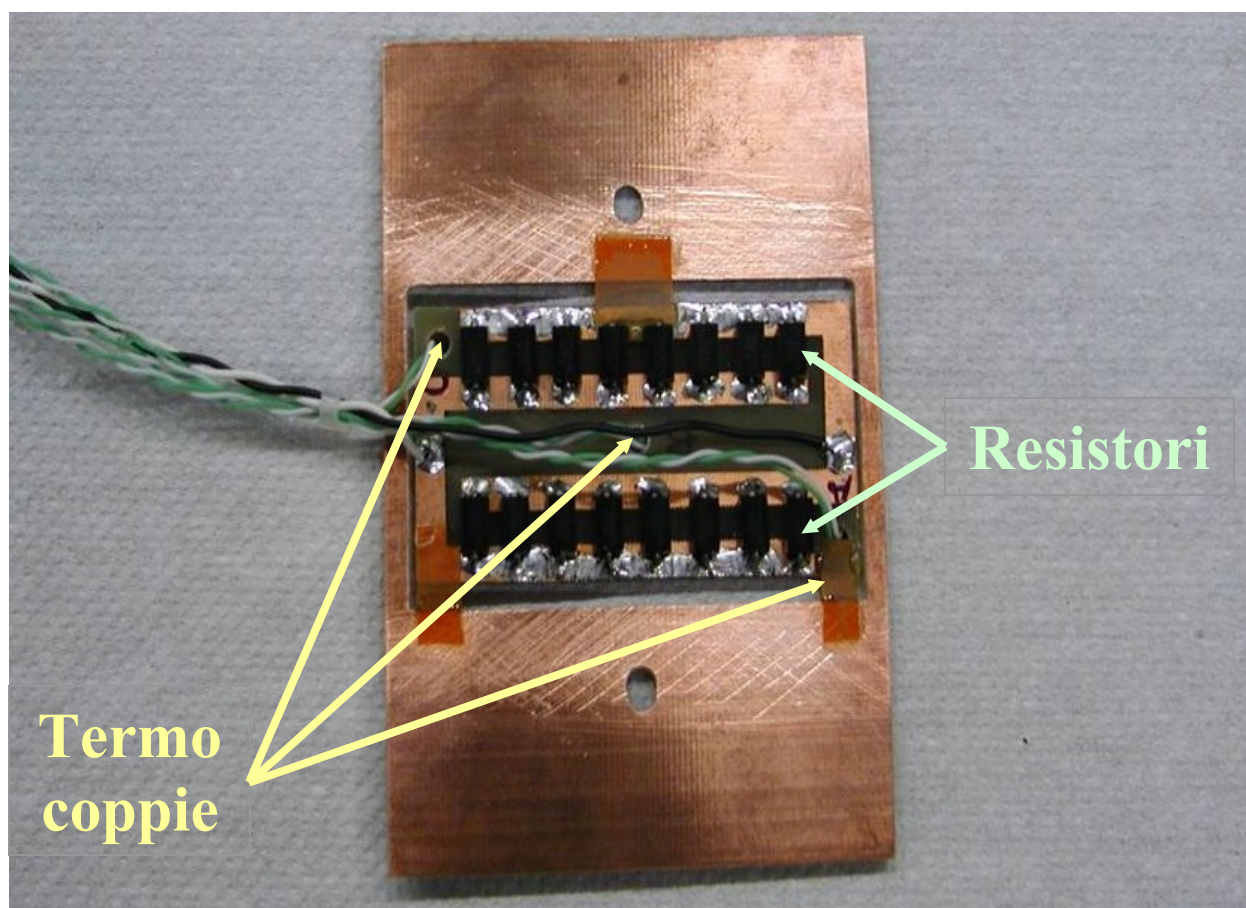


Figura 4.30: prototipo del GigaTracker; in figura vengono mostrati i sedici resistori utilizzati per la generazione di potenza. Si notano inoltre le tre termocoppie necessarie per il monitoraggio della temperatura in corrispondenza di due angoli e della zona centrale.

Si ottiene così la stessa dissipazione del GigaTracker, pari a $P_{TOT} = 32W$. Per le misure di temperatura ci si avvale di tre termocoppie del tipo K, in grado di operare nel range di temperature $(-50\div 250)^{\circ}C$.



Figura 4.31: realizzazione di un semicilindro in Kapton.

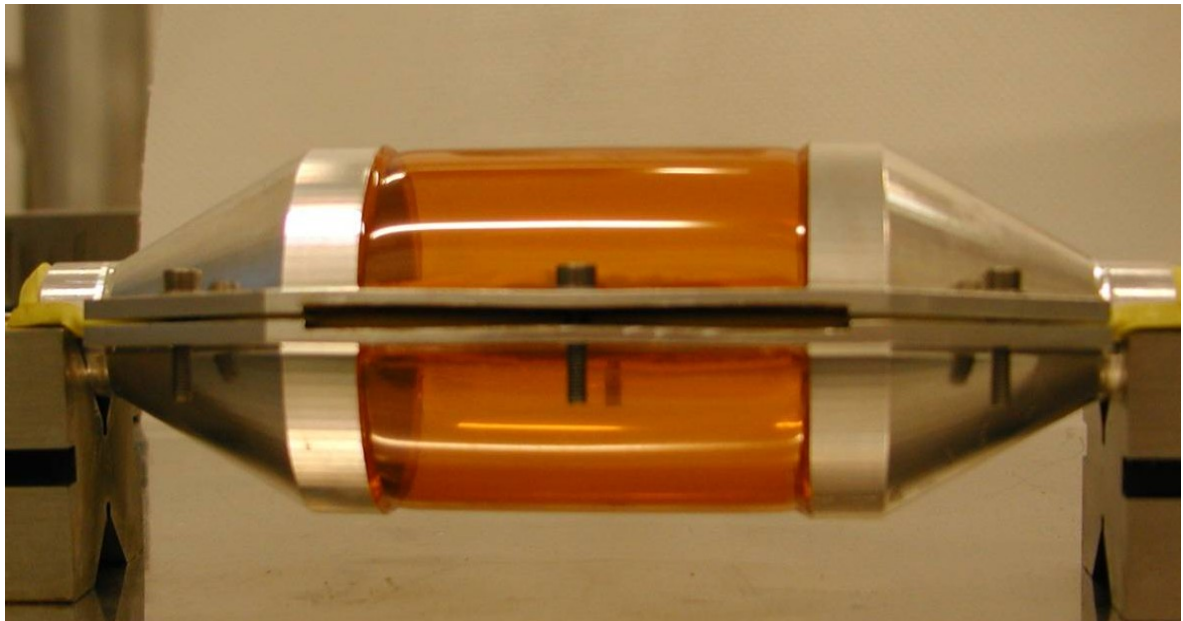


Figura 4.32: visuale laterale del prototipo del GigaTracker racchiuso nel volume delimitato dal cilindro in Kapton.

Si è allestito un apparato sperimentale al fine di effettuare un test di pressione relativamente al prototipo costruito.

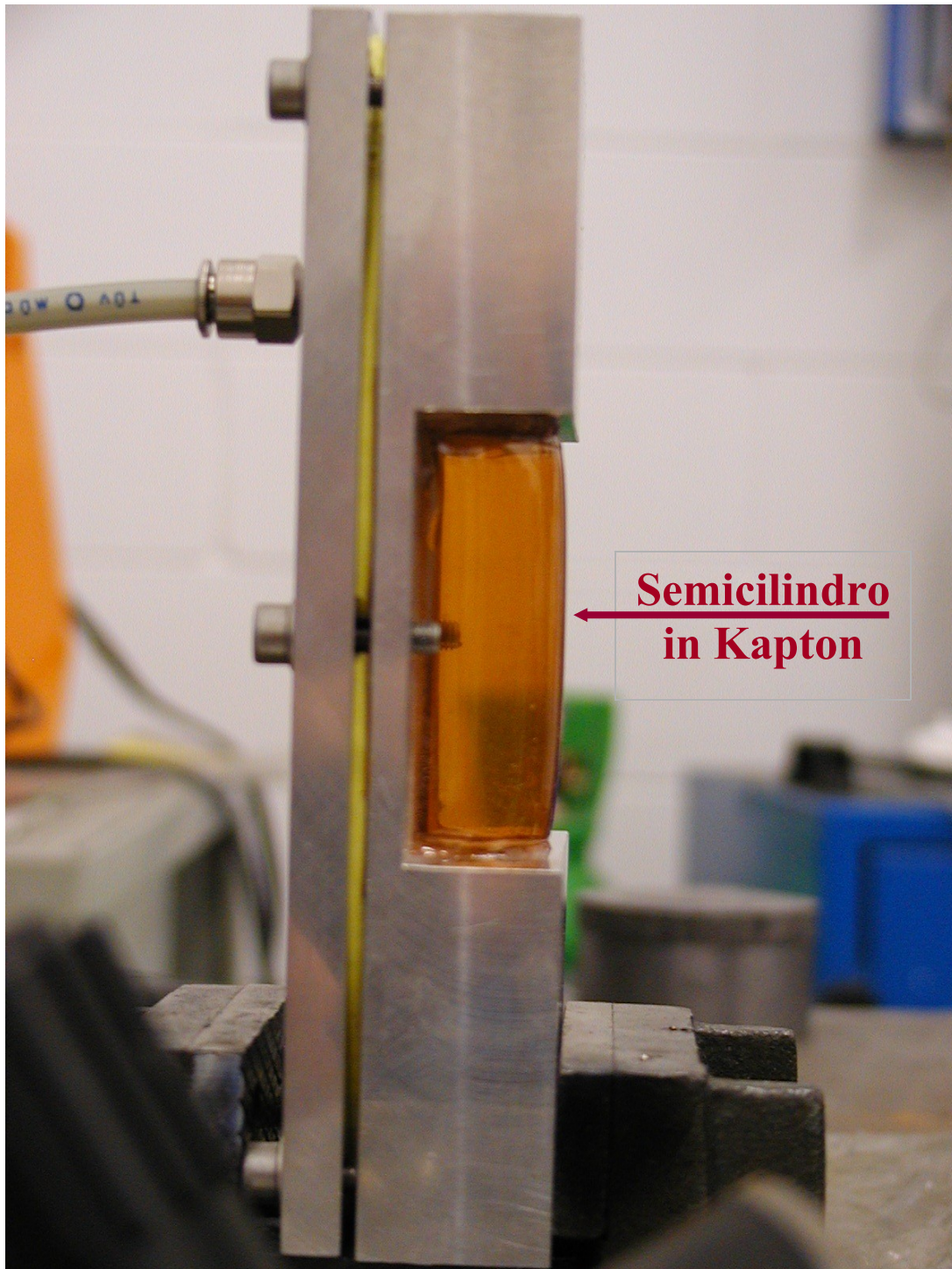


Figura 4.33: apparato utilizzato per lo svolgimento del test di pressione.

Come visto, il sistema di raffreddamento predisposto utilizza gas di azoto refrigerante alla pressione di lavoro $P_{\text{work}} = 1\text{bar}$. Si è quindi effettuata una prova per valutare la stabilità geometrica ad una pressione di test doppia rispetto a quella di esercizio, ovvero $P_{\text{test}} = 2\text{bar}$.

Dopo due settimane non si ha evidenza di nessuna variazione geometrica. Dopodiché si è misurata la pressione di rottura della parete in Kapton, ottenendo $P_{\text{max}} = 5\text{bar}$; in corrispondenza di tale pressione limite si ha il cedimento strutturale del cilindro.

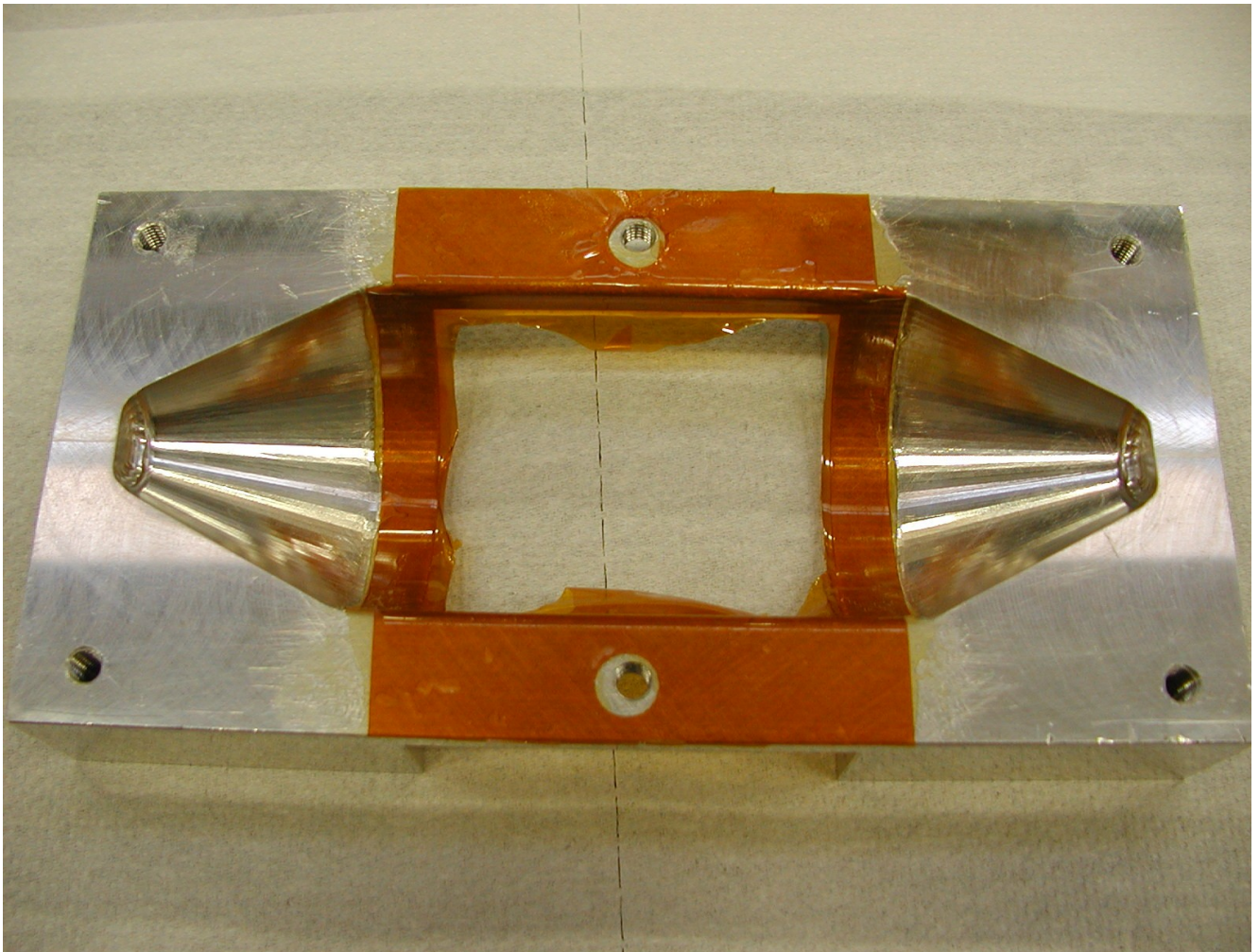


Figura 4.34: rottura della parete di Kapton a seguito del test di pressione massima.

Conclusioni

Il presente lavoro è stato principalmente incentrato sulla realizzazione di un adeguato sistema di raffreddamento per il rivelatore GigaTracker. Per tale realizzazione si è passati attraverso diverse fasi operative di ideazione, progettazione e sviluppo, simulazione, costruzione, verifica e test, raggiungendo alla fine un soddisfacente risultato.

Il lavoro svolto è stato fin dall'inizio in continua evoluzione: particolare importanza hanno rivestito le parti dedicate allo sviluppo e alla simulazione con il software I-DEAS 12, fino al punto in cui il prototipo del GigaTracker, unitamente al suo sistema di raffreddamento, è stato costruito e testato con successo in officina meccanica.

Tenendo presente che inizialmente non si aveva una chiara idea del metodo utile per il sistema di raffreddamento, per la sua ideazione si partiva da zero. Si era invece a conoscenza dell'ambiente operativo limite entro cui si doveva operare e delle ambiziose esigenze sperimentali.

Durante un lavoro in divenire si è pensato a varie possibili configurazioni, le quali presentavano diversi pro e contro. In fase di progettazione ci si è avvalsi del software per disegnare dei modelli precisi, relativamente alle configurazioni individuate. Un ruolo importante è stato rivestito dalla scelta dei materiali e degli spessori, anche in considerazione del fatto che il budget di materiale doveva essere assai ridotto.

Anche per la fase di simulazione della dissipazione di calore del dispositivo ci si è avvalsi del software I-DEAS 12 e più precisamente sono stati discussi in dettaglio i risultati ottenuti nel corso delle simulazioni concernenti le varie configurazioni possibili.

In tutti i casi trattati, la distribuzione di temperatura ottenuta ha evidenziato che si riusciva ad ottenere un adeguato raffreddamento del GigaTracker; si trattava quindi di operare una scelta che fosse la più indicata possibile sotto il profilo termico e che prevedesse anche una quantità minima di materiale addizionale sul fascio, garantendo allo stesso tempo la necessaria stabilità strutturale.

Una volta individuata la configurazione ottimale, è stata avviata la costruzione pratica del prototipo di sistema di raffreddamento per verificare il raggiungimento delle specifiche, a cura dell'officina meccanica della sezione di Ferrara dell'INFN.

La fase di verifica ha dimostrato che il sistema di raffreddamento progettato è in grado di garantire il mantenimento di una temperatura ridotta, rispettando le esigenze sperimentali. Dal punto di vista strutturale, si è dimostrato che il sistema di raffreddamento è adeguato, in quanto adatto ad operare sotto pressioni di esercizio dell'ordine di 1 bar, senza riportare danni.

Appendice

Tecnologie alternative ai vetri al piombo per la realizzazione dei contatori LAV

A.1 Calorimetro à la CKM

Nel caso della tecnologia à la CKM (essenzialmente derivante dall'esperimento CKM del Fermilab, attualmente cancellato), i contatori sono essenzialmente dei calorimetri a forma di corona circolare, di lunghezza pari a $16X_0$; tale corona risulta suddivisa in sedici settori, ciascuno dei quali relativo a 22.5° in modo da coprire l'angolo giro.

Ogni contatore è costituito da 80 strati di materiale scintillante dello spessore di 5mm alternati a fogli di piombo dello spessore di 1mm. Gli strati consecutivi vengono scaglionati in modo leggermente sfalsato per evitare cracks.

Gli strati di materiale scintillante sono dotati di scanalature sulle quali vengono incollate una decina di fibre WLS (Wave Length Shifter). In tal modo la luce di scintillazione, rilasciata dai fogli in materiale scintillante, viene raccolta per mezzo delle fibre WLS; tali fibre la fanno giungere a quattro tubi fotomoltiplicatori PMT (Photo Multiplier Tube) per una sua lettura ridondante.

Le fibre WLS vengono incollate a quattro cilindri in plexiglass, i quali passano attraverso la sezione dell'anello circolare e vanno a connettersi ai tubi fotomoltiplicatori PMT.

Ogni anno ci si attende di ottenere circa una ventina di fotoelettroni per ciascuna particella minimamente ionizzante MIP (Minimum Ionizing Particle). La figura seguente rappresenta schematicamente il calorimetro à la CKM.

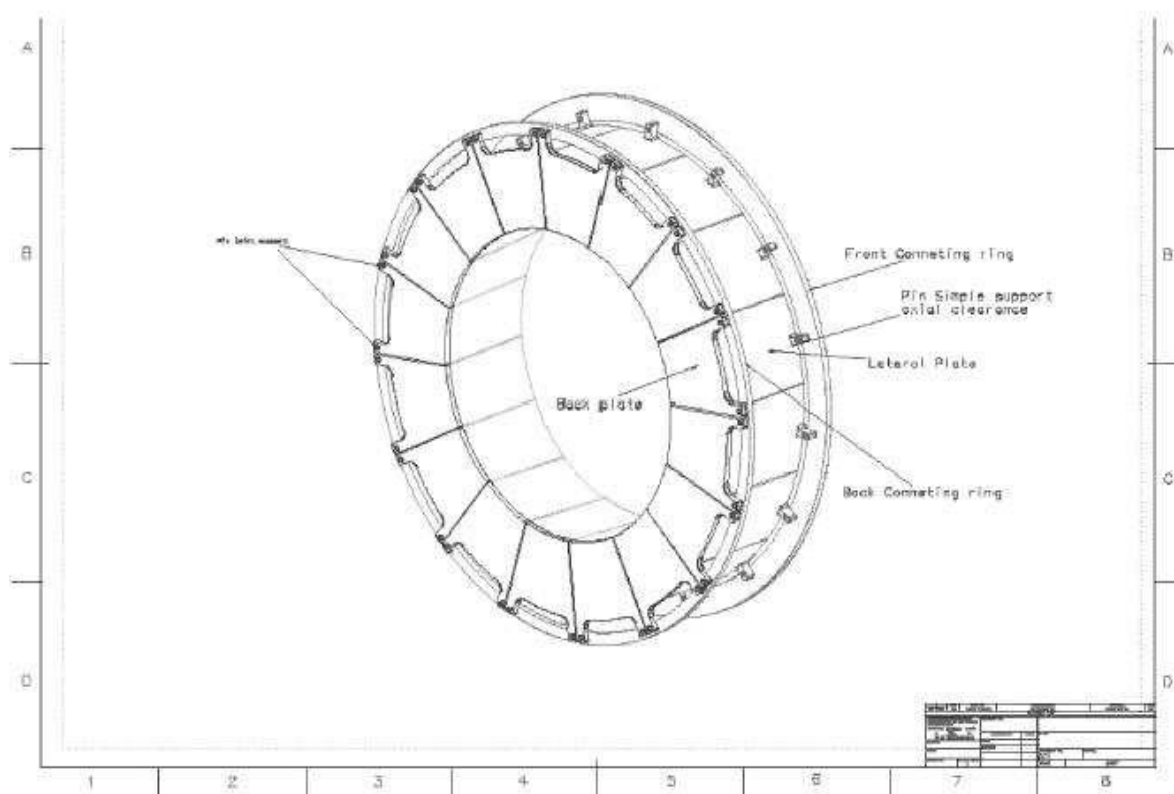


Figura A.1: realizzazione dei contatori LAV mediante la tecnica del calorimetro à la CKM

E' importante mantenere la condizione di vuoto all'interno della camera a vuoto ad un valore di almeno $3 \cdot 10^{-7}$ mbar, al fine di poter ridurre il fondo dovuto alle interazioni fra particelle del fascio e molecole del gas.

I contatori devono essere montati all'interno della camera a vuoto per garantire la massima efficienza di rilevazione dei fotoni; la separazione fra

la struttura dei contatori ed il vuoto della camera viene garantita mediante l'utilizzo di sottili pareti.

A.2 Calorimetro à la KLOE

Una alternativa interessante per la realizzazione dei contatori è costituita dai calorimetri à la KLOE, già utilizzati nell'omonimo esperimento KLOE (K LOnG Experiment).

Tale calorimetro si ricava mediante l'assemblaggio di due moduli di piombo (Pb) ripiegati a forma di C o semianello, per la copertura di un angolo di 180° ciascuno; dall'unione dei due moduli a semianello si ricava un calorimetro composto a forma di anello per la copertura dell'angolo giro. I moduli a forma di semianello sono dotati di scanalature sulle quali vengono allineate ed incollate delle fibre scintillanti di diametro 1mm, separate fra di loro mediante degli strati di piombo dello spessore di 0.5mm; si ricava una struttura a sandwich molto omogenea, la quale consente di ottenere delle misure con buona risoluzione sia temporale che spaziale.

Le fibre scintillanti dovrebbero essere del tipo Bicron BCF-12 oppure Kuraray SCF-81. Il calorimetro à la KLOE può anche essere costruito in modo modulare, andando cioè ad utilizzare molti moduli di piombo in successione e coprendo in tal modo un maggior numero di lunghezze di radiazione. Inoltre è possibile ricavare calorimetri di varie forme, essendo che l'unico vero limite è rappresentato dal raggio minimo a cui si possono piegare le fibre senza danneggiarle; il limite inferiore per tale raggio è dell'ordine della decina di centimetri.

La figura seguente rappresenta schematicamente il calorimetro à la KLOE.

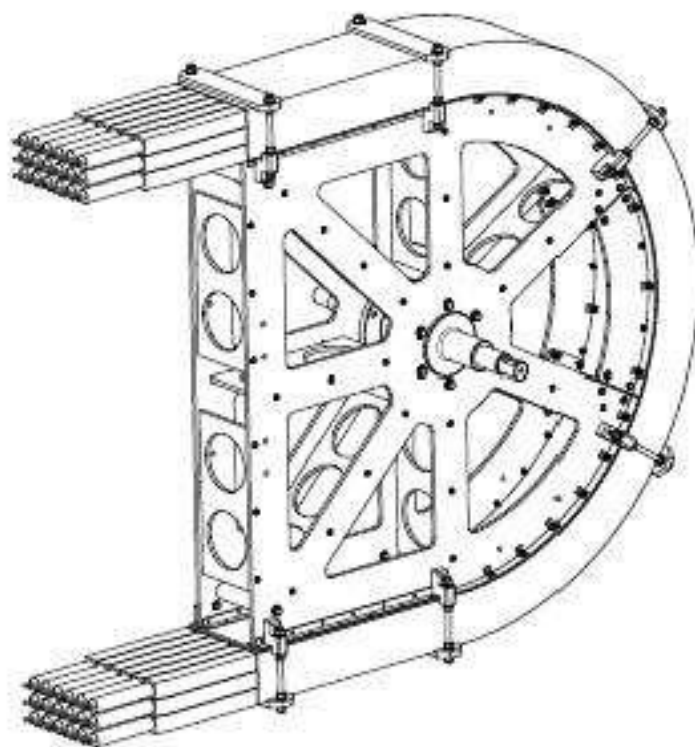


Figura A.2: realizzazione dei contatori LAV mediante la tecnica del calorimetro à la KLOE.

Anche in questo caso la tecnica di lettura prevede l'utilizzo di tubi fotomoltiplicatori PMT (Photo Multiplier Tube), connessi alle fibre scintillanti su entrambi i lati del calorimetro (cioè alle estremità di entrambi i moduli a forma di semianello).

Si tratta di un fatto molto importante, in quanto un sistema di lettura doppia permette di migliorare sia la risoluzione temporale che quella spaziale delle misure effettuate. La lettura dei segnali alle estremità dei moduli a semianello avviene tramite una griglia formata da 4 x 4 tubi

fotomoltiplicatori PMT (Photo Multiplier Tube), come illustrato dalla figura sottostante.

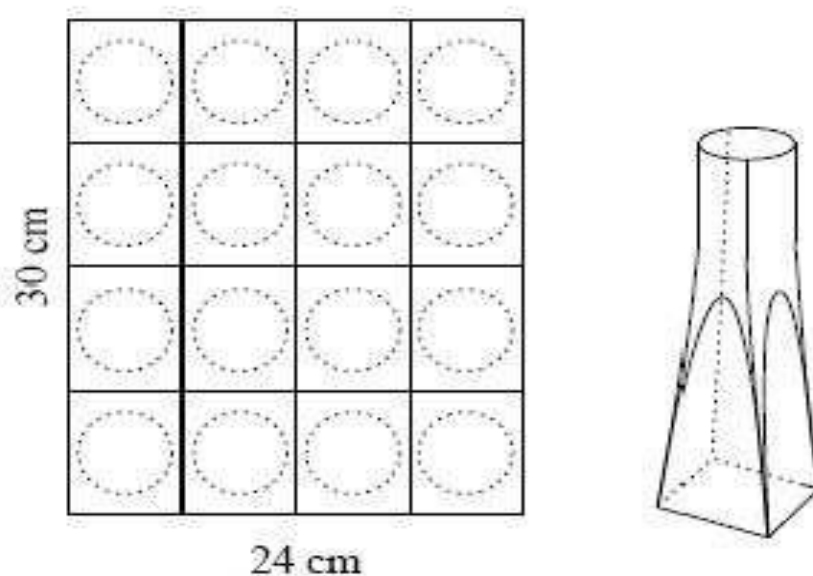


Figura A.3: schema di lettura dei segnali; la figura di sinistra rappresenta una griglia di 4x4 tubi fotomoltiplicatori PMT; la figura di destra rappresenta una guida concentratrice di luce del tipo Winston.

La lettura su ambo i lati consente di risalire al punto di impatto tramite la valutazione della differenza fra i tempi di rilevamento dei segnali alle due estremità; l'accuratezza della misura è elevata.

E' anche possibile che si decida di utilizzare una griglia leggermente più estesa, ossia formata da 4 x 6 tubi fotomoltiplicatori.

Ciascun PMT ricopre un'area di $6 \times 7.5\text{cm}^2$. La luce viene convogliata poi su una apposita guida concentratrice di luce del tipo Winston in plexiglass: la sua efficienza di raccolta della luce dovrebbe superare il 90%.

Bibliografia

- [1] *A. Ceccucci et al.*, Proposal to Measure the Rare Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ at the CERN SPS

- [2] *Ian J. R. Aitchison, Antony J. G. Hey*, Non-Abelian gauge theories: QCD and the electroweak theory

- [3] *Gordon Kane*, Modern elementary particle physics

- [4] *Donald H. Perkins*, Introduction to high energy physics

- [5] *A. J. Buras et al.*, *Phys. Rev. Lett.* *95*, 261805 (2005), Rare Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ at the Next to Next to Leading Order in QCD

- [6] *The GigaTracker Working Group*, NA62/P-326 Status Report

- [7] *M. Moulson et al.*, A Prototype Large-Angle Photon Veto Detector for the P326 Experiment at CERN

- [8] *The NA62 Photon Veto Working Group*, Photon Vetoes – Upgrade to the Proposal

- [9] *The GigaTracker Working Group*, The GIGATRACKER: Addendum to the NA62 Proposal

[10] *Lau Gatignon, N. Doble*, The High Intensity K⁺ Beam – Rev.3

[11] *M. Fiorini, F. Osmic, F. Petrucci, P. Riedler*, Test of Silicon Sensors for a High Rate Pixel Detector for the NA62 Experiment

Ringraziamenti

Desidero esprimere alcuni ringraziamenti, più che doverosi, nei confronti di alcune persone che hanno fornito contributi preziosi alla stesura della presente tesi di dottorato.

Ringrazio in modo particolare Massimiliano Fiorini per essere riuscito a trovare il tempo di revisionare, in modo impeccabile, i capitoli 1, 2 e 3 della tesi ed aver quindi dato un contributo determinante alla loro stesura. Ringrazio l'ingegner Vittore Carassiti per l'assistenza fornita ed il prezioso lavoro svolto nell'ambito delle simulazioni con il software I-DEAS 12, oltre che per il test di pressione e l'ottima revisione del capitolo 4 della tesi.

Infine vorrei ringraziare le persone che hanno prestato la loro opera per lo sviluppo e la costruzione del GigaTracker: ricordo l'ingegner Angelo Cotta Ramusino insieme a Claudio Padoan per la parte elettronica; ricordo anche Federico Evangelisti, Luca Landi e Marco Statera per la parte meccanica.

