

LNF-06/31 (Thesis)

27 Dicembre, 2006



**Università degli Studi di Roma
“La Sapienza”**

Scuola di Ingegneria Aerospaziale

Tesi di laurea specialistica in

INGEGNERIA ASTRONAUTICA

**STUDIO DEI MATERIALI E INTERAZIONE CON I GAS
PRESENTI NEI RILEVATORI A MUONI PER
L’ESPERIMENTO CMS**

Laureando:
Cristiano Pucci
Matricola 789210
Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

Relatore:
Prof. Antonio Paolozzi
Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

Co-Relatore:
Dr. Luigi Benussi
Laboratori Nazionali di Frascati dell’INFN

Anno Accademico 2005–2006

Sommario

RINGRAZIAMENTI	4
INTRODUZIONE	6
Capitolo 1 Fisica di base dell'esperimento CMS	8
Il Modello Standard e la struttura della materia	8
1.1 Introduzione	9
1.2 La struttura della materia e la scoperta dell'antimateria.....	9
1.3 Il Modello Standard.....	11
1.4 Obiettivi dell'esperimento CMS	13
1.4. 1 Caratteristiche del detector CMS.....	14
1.5 Descrizione del rivelatore CMS	16
1.5.1 Componenti del rivelatore CMS.....	17
1.5.2 Il sistema calorimetrico.....	18
1.5.3 Il magnete.....	18
1.5.4 Il sistema di muoni	19
Capitolo 2 Il Rivelatore ad RPC	20
2.1 Il materiale di cui sono fatti gli RPC: la bachelite	21
2.2 Descrizione del rivelatore RPC.....	25
2.3 Principi di funzionamento.....	27
2.4 Disposizione delgi RPC nel detector CMS.....	31
Capitolo 3 GAS GAIN MONITORING SYSTEM e suo set-up presso i LNF dell'INFN	33
3.1 Introduzione	34
3.2 Conceptual design	34
3.3 Realizzazione di un primo prototipo	37
3.3.1 Il punto di lavoro	39
3.3.2 Taratura dei flussimetri.....	39
3.4 Il sistema di trigger.....	44
Capitolo 4 Test di qualità delle camere ed analisi delle correnti	48
4.1 Introduzione	49
4.2 Caratterizzazione meccanica.....	49
4.3 Caratterizzazione elettrica.....	50
4.4 Test di qualità con radiazione cosmica.....	51
4.5 Test di qualità presso la ISR	54
4.6 Il Closed Loop (CL) all'ISR	55
4.6.1 Molecular Sieves	56
4.6.2 I filtri metallici.....	57
4.6.3 Rigenerazione dei filtri	58
4.7 Analisi delle correnti	59

Capitolo 5 Programma di indagine delle problematiche relative al Closed Loop	65
5.1 Il sistema di fornitura della miscela gassosa.....	66
5.1.1 Primary gas supply	66
5.2 Circolazione a ciclo chiuso: il closed loop	67
5.3 L'installazione nel building SG5	68
5.3.1 Moduli di miscelamento	69
5.4.1 Moduli di purificazione.....	70
5.5 Il sistema del gas nella caverna UX	71
5.5.1 Caverna UX: racks di distribuzione.....	71
5.6 Il problema dell'inquinamento della miscela gassosa.....	73
5.7 Gap 50 x 50 cm ² sottoposta ad irraggiamento alla GIF.....	74
5.7.1 Ispezione visiva	75
5.7.2 L'analisi SEM/EDS	77
5.7.2.1 <i>Principi generali della spettroscopia EDS</i>	77
5.7.2.2 <i>Risultati</i>	80
5.7.3 Diffrazione ai raggi X	85
5.7.3.1 <i>Principi generali dell'XRD (X-Ray Diffraction)</i>	85
5.7.3.2 <i>Interazione fascio-campione</i>	87
5.7.3.3 <i>Risultati</i>	88
5.7.4 Provenienza dell' Na. Mappatura degli elementi su sezioni di bachelite	91
5.8 Analisi fluidodinamica dei flussi interni alla gap	93
5.9 Conclusioni	101
Capitolo 6 Misura del rate di radiazione cosmica all'interno di moduli spaziali abitati con l'utilizzo di un telescopio a RPC.....	105
6.1 La radiazione cosmica	105
6.2 Raggi cosmici primari e secondari	107
6.3 Composizione della radiazione cosmica primaria.....	113
6.4 Soluzioni proposte contro il rischio radiazioni per le missioni umane nello spazio	115
6.4.1 Scudo protettivo con interposizione di materiale	116
6.4.2 Scudo magnetico e schermo elettrostatico	117
6.4.3 Metodi di misura della dose assorbita	121
6.5 Un monitor ad RPC	122
Appendice.....	125
Tabelle delle correnti monitorate alla ISR.....	125
Bibliografia.....	141
Sitografia	142

Ringraziamenti

Esattamente due anni fa, il presidente della sessione di laurea di primo livello ci proclamò laureati in Ingegneria Aerospaziale con l'augurio di ritrovarci di nuovo lì dopo due anni per discutere la tesi per la laurea specialistica: ebbene eccomi di nuovo, e senza ancora rendermene conto, presente all'appuntamento.

Ma più di allora sento forte l'esigenza di ringraziare quanti, alla fine, hanno reso possibile ciò.

I miei più sentiti ringraziamenti vanno prima di tutto allo "staff" di professori dell'università e dell'INFN che sono stati coinvolti insieme a me in questo importante lavoro di indagine; a Luigi Benussi, mio relatore esterno presso i Laboratori Nazionali di Frascati, per la sua disponibilità e pazienza e per l'importante aiuto datomi nella fase concitata e rapidissima di correzione della tesi, a Stefano Bianco e Franco Fabbri per "avermi gettato nella mischia" e fatto crescere facendomi vivere sul campo l'importante esperienza di un così grande ed ambizioso progetto, al professor Antonio Paolozzi per il supporto e l'importante carica umana che mi ha trasmesso, al professor Felli e alla dottoressa Saviano per avermi trattato quasi come un figlio incoraggiandomi e supportandomi nell'ultima "rapidissima" fase della mia carriera di studente. Non posso poi dimenticare il gruppo di tecnici elettronici al laboratorio ASTRA (Luciano, Alessandro e Daniele).

Un grazie, infine, al Prof. Stella e al Prof. Bruno per le importanti indicazioni ricevute per lo sviluppo dell'analisi fluidodinamica e alla segreteria della Scuola per l'aiuto burocratico.

Non so come mi sentirò dopo la discussione ma so per certo che laurearsi non vorrà dire dimenticare chi, studente come me, mi ha comunque aiutato nel corso di questi anni, studiando insieme, ridendo e anche discutendo. Il mio grazie va quindi anche ad Alessandro, Giovanna, Simone, Vincenzo e Clelio e a Luigi e Marco con i quali mi rimarrà per sempre il ricordo della preparazione dell'ultimo esame.

E per non dimenticare i miei amici di sempre grazie anche a Marco, Alessandro Davide e Guido.

Grazie alla mia famiglia, a Gianni e ai nonni, comunque tutti e quattro presenti.

Da ultimo grazie anche a chi nella sofferenza mi ha fatto capire che a volte nella vita è bene fermarsi a riflettere e guardarsi attorno prima di partire per un nuovo slancio...grazie signor Fernando!

Introduzione

Il presente lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito di una collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare presso i laboratori di Frascati e il CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) di Ginevra (Svizzera).

Esso si inserisce nello sviluppo di un sistema di controllo della miscela gassosa con cui sono flussati i rivelatori a piatti resistivi (RPC) dell'esperimento CMS (Compact Muon Solenoid) in fase di installazione presso il CERN di Ginevra.

L'importanza di tale sistema risiede nella elevata sensibilità del punto di lavoro di tali rivelatori ad una variazione delle caratteristiche dielettriche, e quindi composizionali, della miscela con cui essi sono flussati.

Si presenterà nelle pagine che seguono una panoramica della fisica alla base dell'esperimento CMS e dei suoi obiettivi e una descrizione del detector e dei sottosistemi che lo compongono (cap1). Si vedrà poi la struttura e i principi di funzionamento del rivelatore RPC, oggetto della presente tesi (cap 2) e il setup del sistema di controllo della miscela gassosa (Gas Gain Monitoring System) ideato e progettato dal grupo CMS RPC di Frascati (cap 3).

Prove di test al vecchio acceleratore ISR, riconvertito in area di qualifica, presso il CERN, su camere prima dell'installazione nel detector, hanno evidenziato sensibili aumenti di corrente in alcuni rivelatori dopo qualche giorno di funzionamento con sistema di alimentazione del gas a ciclo chiuso. Tale aumento mostra tendenza a riportarsi ai valori normali nelle successive fasi di flussaggio della camera con sistema di alimentazione a ciclo aperto (cap 4). Questa importante problematica ha portato ad effettuare al monitoraggio giornaliero delle correnti nelle camere e alla pianificazione di un programma sistematico di indagine del sistema di alimentazione a ciclo chiuso per determinarne la causa. Le analisi, tuttora in corso, hanno riguardato l' indagine di camere

utilizzate per prove di irraggiamento e i filtri in uso presso l'ISR nel sistema a ciclo chiuso, per le attuali prove di qualifica delle camere ad RPC (cap5).

Si è fatto ricorso a microspettroscopia elettronica SEM/EDS (microscopio elettronico a scansione e spettrometria per dispersione di energia) e diffrattometria a raggi X XRD (X-Ray Diffrattometry).

Da ultimo si è fatto ricorso all'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics) per verificare le capacità di lavaggio all'interno della camera.

Per le analisi dei filtri è in corso il campionamento degli stessi e quindi al momento non è possibile presentare risultati; su di essi verranno effettuate analisi chimiche per determinarne la loro composizione e confrontare le variazioni a seguito del loro utilizzo e dopo la loro rigenerazione.

L'ultimo capitolo proposto caratterizza in minima parte questa tesi in campo aerospaziale. La competenza e la conoscenza del funzionamento di camere ad RPC acquisite ha portato a valutare una loro ipotesi di utilizzazione, data la loro elevata risoluzione temporale e buona risoluzione spaziale, come contatori di radiazione da installare all'interno di moduli abitati per missioni interplanetarie. Si valuterà la loro possibilità di utilizzo come contatori di radiazione incidente per verificare l'efficienza di un'eventuale scudo di protezione per la radiazione cosmica (Cap 7)

Capitolo 1

Fisica di base dell'esperimento CMS Il Modello Standard e la struttura della materia

1.1 Introduzione

La ricerca sui costituenti fondamentali della materia e sulle forze che agiscono tra loro ha condotto, nel corso del '900, a risultati considerevoli, fino all'elaborazione di una teoria che descrive con una buona precisione il mondo delle particelle elementari. Dalla metà degli anni 60, per i fisici è stato chiaro che il modello che si aveva della struttura della materia, secondo cui gli atomi erano composti da protoni, neutroni ed elettroni fondamentali, non era sufficiente a spiegare la miriade di nuove particelle osservate. Risolse il problema la teoria dei quark di Gell-Mann e Zweig. Negli ultimi trent'anni, la teoria si è arricchita e ha guadagnato crescente favore con nuove prove sperimentali ai moderni acceleratori di particelle. Oggi tale teoria è nota col nome di Modello Standard delle particelle e interazioni fondamentali.

La teoria divide le particelle elementari in due classi: i leptoni, soggetti solo alle interazioni elettromagnetiche, deboli e gravitazionali, e i quarks che sono sensibili anche alle interazioni forti. Le forze tra le varie particelle sono rappresentate come scambi di quanti di energia: il fotone per le forze elettromagnetiche, i bosoni Z^0 e $W^{+/-}$ per le interazioni deboli, i gluoni per le interazioni forti, infine i gravitoni, non ancora osservati, per le forze gravitazionali.

In questo capitolo si propone una panoramica generale sulla teoria del Modello Standard e sugli interrogativi che esso ancora pone; inoltre si introducono i motivi che hanno portato alla nascita del progetto CMS*.

1.2 La struttura della materia e la scoperta dell'antimateria

È possibile suddividere tutte le particelle elementari che costituiscono la materia in due grosse categorie: i *quark* e i *leptoni*. Un quark è una particella avente carica elettrica frazionaria.

* Compact Muon Solenoid

Se ne conoscono 6 tipi (o "sapori"), denominati *up* (u), *charm* (c) e *top* (t) di carica elettrica pari a $2/3$, *down* (d), *strange* (s) e *bottom* (b) di carica elettrica pari a $-1/3$. I componenti della famiglia leptonica sono: *fotone* (γ), *neutrino elettronico* (ν_e), *elettrone* (e), *neutrino muonico* (ν_μ), *muone* (μ), *neutrino del tau* (ν_τ), *particella tau* (τ).

Nel 1928 Paul Dirac, alla ricerca di una teoria che conciliasse i principi della meccanica quantistica con quelli della relatività ristretta di Albert Einstein, arrivò alla formulazione della meccanica quantistica relativistica ed ipotizzò l'esistenza dell'antimateria. Tale teoria prevede per ogni particella dotata di carica elettrica, l'esistenza di un'altra particella dotata di massa identica ma carica elettrica opposta: quella che oggi viene chiamata antiparticella.

Nel 1932 Carl Anderson provò l'esistenza dell'antimateria nel corso di un esperimento volto a studiare la natura dei Raggi Cosmici.* Da allora le evidenze sperimentali dell'esistenza dell'antimateria si sono succedute a ritmo crescente ed attualmente la creazione di antiparticelle è un fenomeno di routine in numerosi laboratori di alte energie di tutto il mondo. Nel linguaggio usuale il simbolo dell'antiparticella è quello della particella con una barra sopra, come mostrato nello schema di figura 1.1. Quando materia e antimateria si incontrano, si verifica un completo mutamento della massa in energia; questo processo prende il nome di *annichilazione*. Secondo la teoria quantistica dei campi (Quantum Field Theory QFT), la materia è costituita da particelle di materia a spin semintero dette *fermioni*, che interagiscono per mezzo di quattro forze fondamentali (forza gravitazionale, forza elettromagnetica, forza debole e forza forte), mediante lo scambio di altri tipi di particelle di campo a spin intero dette *bosoni*.

* In particolare, l'esperimento analizzava le tracce lasciate dalle particelle nell'attraversamento di una *camera a nebbia* (un apparato costituito sostanzialmente da una camera piena di vapore, in cui il passaggio di una particella carica viene visualizzato dall'apparire di una scia di bollicine). Fra tante tracce ordinarie, Anderson ne identificò una particolare, che corrispondeva al passaggio di una particella con massa uguale all'elettrone ma carica elettrica opposta, cioè positiva: era il primo segno tangibile dell'esistenza dell'antielettrone, che oggi chiamiamo positrone..

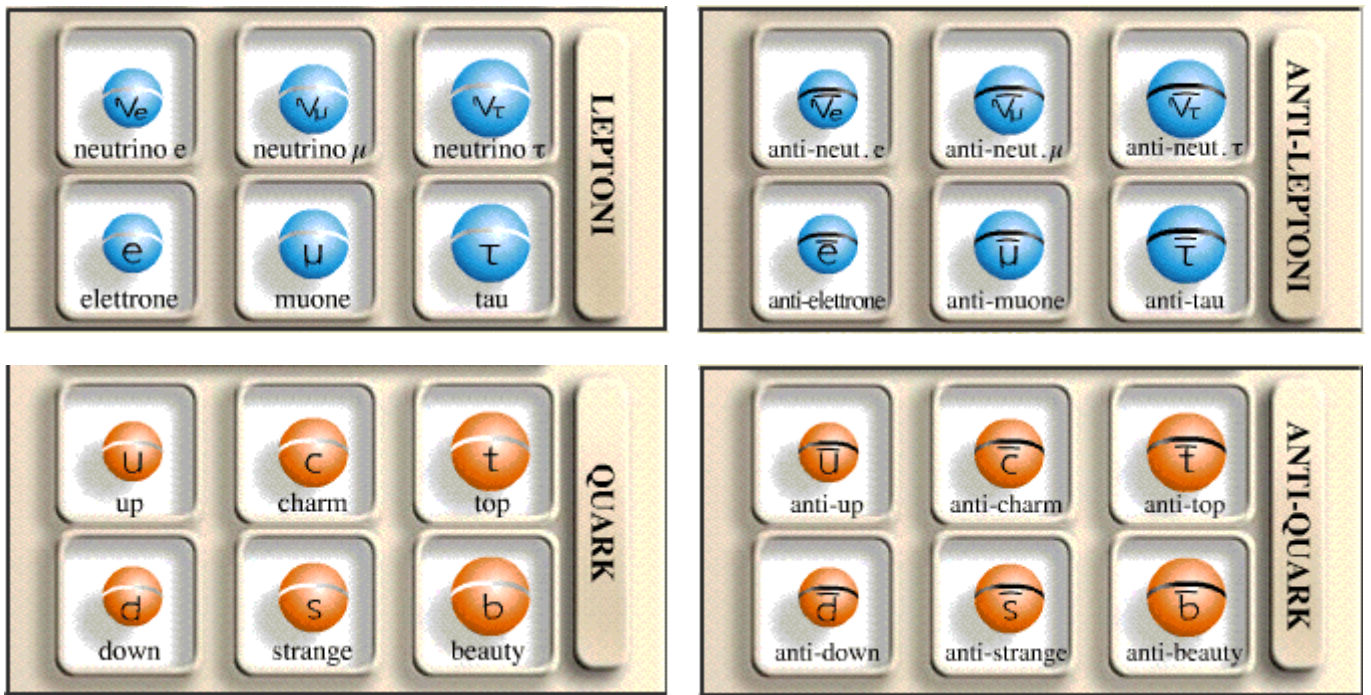


Figura 1.1: Schema riassuntivo delle particelle e delle rispettive antiparticelle

1.3 Il Modello Standard

Il Modello standard è una teoria fisica che riassume tutte le attuali conoscenze nel campo delle particelle elementari e delle forze che ne regolano le interazioni fondamentali.

La forza di tale teoria è nella capacità di descrivere tutta la materia sulla base di poche particelle ed interazioni fondamentali.

Poiché la materia è composta dalle stesse particelle, la base dello studio delle interazioni consiste nell'analisi delle leggi che regolano l'azione mutua tra tali entità; tale esame si semplifica considerando che tutte le forze conosciute si possono ridurre a quattro tipi fondamentali (interazione elettromagnetica, forza nucleare forte e debole e interazione gravitazionale).

Sino al sec. XIX si conoscevano solo due di queste interazioni, a quel tempo era già nota la forza gravitazionale. Storicamente il secondo tipo di interazione studiata fu l'interazione elettromagnetica.

Il nome di quest'ultima deriva dal fatto che elettricità e magnetismo sono due diversi aspetti dello

stesso fenomeno, peraltro più complesso della gravitazione, non solo per l'esistenza di due tipi di cariche elettriche, ma anche per la dipendenza di queste interazioni dalla velocità delle particelle cariche che ne sono responsabili.

Successivamente la scoperta del neutrone implicò la considerazione delle interazioni forti; l'interazione elettromagnetica è responsabile della coesione tra gli elettroni e il nucleo negli atomi. Quando si scende alla scala del nucleo atomico, i protoni e i neutroni sono tenuti insieme da un'altra forza, l'interazione forte che impedisce al nucleo di disintegrarsi in conseguenza della repulsione coulombiana tra i protoni del nucleo. L'interazione forte non è però connessa direttamente a neutroni e protoni, bensì a uno strato di struttura più profondo al loro interno, al livello dei quark*.

Il decadimento del neutrone e l'ipotesi del neutrino indussero, infine, Fermi ad introdurre un quarto tipo di interazione: le interazioni deboli*, di intensità inferiore a quelle forti, ma sensibilmente superiore a quella delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche. Tali interazioni governano il decadimento di molte particelle che interagiscono fortemente e sono responsabili del decadimento di certi nuclei radioattivi. L'agente responsabile delle interazioni deboli è rimasto sconosciuto fino agli inizi degli anni Ottanta; fino a che nel 1983 il fisico italiano C. Rubbia con un gruppo di ricercatori del CERN di Ginevra scoprì le particelle attraverso le quali interagiscono le interazioni deboli, individuandole nei bosoni Z^0 e $W^{+/-}$.

* L'evidenza sperimentale dell'esistenza dei quark proviene da una serie di esperimenti eseguiti alla fine degli anni Sessanta e negli anni Settanta, iniziati dai ricercatori della Stanford University in California. Questi esperimenti utilizzavano fasci di elettroni di elevata energia che venivano sparati contro i nuclei atomici. Lo studio della diffusione degli elettroni dopo l'urto con i nuclei mise in evidenza la struttura interna dei protoni e dei neutroni.

* Una particolare manifestazione dell'interazione debole è il decadimento β . In tale processo si ha la trasformazione di un neutrone in un protone più un elettrone e un antineutrino elettronico ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$)

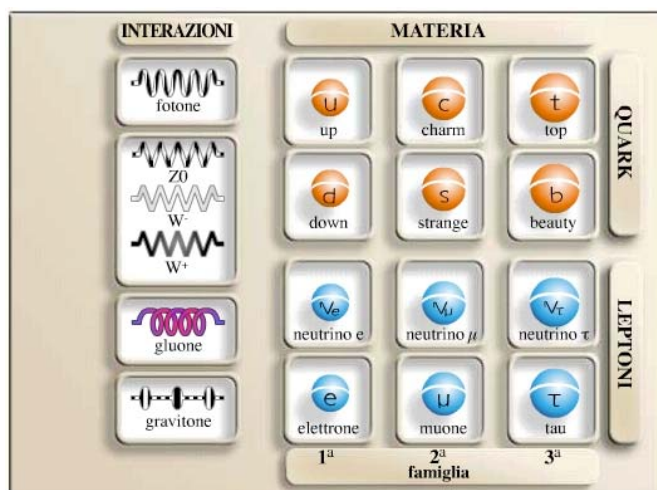


Figura 1.2 Il modello standard: il gravitone (interazione gravitazionale) agisce su tutte le particelle. Il gluone (interazione forte) agisce su tutti i quark, il fotone (interazione elettromagnetica) agisce su tutte le particelle dotate di carica elettrica, quindi su tutti i quark e su *elettrone*, *muone* e *tau*. I bosoni intermedi Z^0 , W^- e W^+ (interazione debole), agiscono su tutte le particelle. L'unico mattone mancante di questo modello è il bosone di Higgs che verrà cercato dagli esperimenti di LHC, Atlas e CMS

1.4 Obiettivi dell'esperimento CMS

L'obiettivo principale della Collaborazione CMS (Compact Muon Solenoid) è scoprire la fisica alla base della rottura della simmetria tra le masse delle particelle, che nella teoria del modello standard è il meccanismo che permette di assegnare le masse a tutte le particelle. Sebbene esistano diverse possibilità teoriche, la più accreditata è quella del meccanismo di Higgs, il quale prevede l'esistenza di una particella detta appunto bosone di Higgs. La presenza di questa particella può essere dimostrata osservando i prodotti del suo decadimento; per rivelarli in maniera chiara occorre poter identificare e misurare con precisione l'energia di muoni, elettroni, fotoni e jets su un ampio intervallo di energia. CMS è un rivelatore per collisioni protone-protone in grado di lavorare nel regime di più alta luminosità[†] di LHC[‡] ($L > 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Il suo design è stato ottimizzato per la ricerca del bosone di Higgs su un intervallo di massa dell'Higgs che va da 80 GeV fino a 1 TeV ma

[†] La luminosità

[‡] Il Large Hadron Collider è costruito in un tunnel circolare di 27 Km di circonferenza. Il tunnel si trova tra i 50 e i 175 m sottoterra, ed è situato a cavallo del confine franco-svizzero. È stato progettato per far collidere due fasci controrotanti di protoni o ioni pesanti. I fasci ad alta energia si muovono nell'anello di LHC in un vuoto e sotto la guida di magneti. I magneti sono superconduttori e sono raffreddati con un sistema criogenico.

potrà indagare anche ulteriori meccanismi per la rottura della simmetria elettrodebole. Altra ricerca fondamentale per cui CMS è stato progettato sono studi sulla violazione di CP (settore B) e sul top quark. Ulteriore obiettivo di CMS è condurre studi sulla formazione del plasma di quark e gluoni (Quark Gluon Plasma QGP): uno dei segnali più indicativi della formazione del QGP sarà l'osservazione di anomalie nella frequenza di produzione degli stati legati di quark pesanti J/Ψ , Ψ' e delle particelle della famiglia Y. Le alte energie in gioco a LHC potranno inoltre permettere studi sulla presenza di “nuova fisica” ovvero di nuove particelle non previste dal modello standard ma previste da teorie successive che potrebbero permettere l'unificazione di tutte le forze della natura in un'unica teoria (Great Unification Theory GUT)

1.4. 1 Caratteristiche del detector CMS

Le principali caratteristiche del design di CMS:

- un ottimo sistema di rivelazione dei muoni;
- ottima calorimetria elettromagnetica;
- sistema di tracciamento delle particelle con alta risoluzione;
- un calorimetro adronico con sufficiente risoluzione in energia e buona ermiticità;

tutto ciò per un rivelatore che costa poco meno di 475 milioni di franchi svizzeri.

Questi traguardi verranno raggiunti da CMS i cui tratti distintivi sono proprio un campo magnetico solenoidale di elevata intensità (4T) accoppiato ad un sistema di rivelazione dei muoni a più strati, un calorimetro elettromagnetico costituito da cristalli scintillanti ed un potente sistema di tracciamento interno basato su una granularità fine di microstrip e rivelatori a pixel. Queste caratteristiche consentono una misura molto buona dell'energia di muoni, elettroni, di altre

particelle cariche e di fotoni tipicamente con una precisione di circa l'1% a 100GeV. Una precisione così elevata consente un'eccellente risoluzione in massa per stati di massa intermedi fra quelli del bosone di Higgs, dello Z^0 , dei mesoni B per le collisioni protone-protone o per gli stati Y nelle collisioni di ioni pesanti. CMS è essenzialmente un potente e compatto spettrometro, ben adattato alla fisica di LHC, capace di condurre studi sul meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole (ricerca del bosone di Higgs e di particelle supersimmetriche), sulla violazione di CP, sulla formazione del plasma di quark e gluoni e molto altro. L'uso di un calorimetro a cristalli e di rivelatori a pixel aumenta notevolmente il potenziale di queste ricerche. La scelta dei parametri e della configurazione del campo magnetico. Un importante aspetto dell'intero design del rivelatore è la configurazione e la scelta dei parametri del campo magnetico per la misura dell'impulso dei muoni; tenendo conto che non è richiesta una elevata precisione nella loro tracciatura ma solo una ottima capacità di rivelarli in maniera molto rapida e efficiente, la scelta di un elevato valore del campo magnetico è stata quella più naturale. Sono state considerate sia la soluzione toroidale sia quella solenoidale. La scelta è caduta su quella solenoidale per le seguenti ragioni:

con un campo magnetico parallelo all'asse dei fasci, la curvatura delle tracce dei muoni avviene sul piano trasverso a quello dei fasci stessi. In questo piano, le dimensioni trasverse piccole dei fasci determinano la posizione trasversa del vertice con un'accuratezza migliore di $20\mu\text{m}$. La curvatura accentuata nel piano trasverso facilita il compito dei trigger basato sul puntamento delle tracce al vertice da cui provengono.

La misura del momento nel caso solenoidale inizia a $r = 0$, mentre nel caso toroidale inizia dopo gli elementi assorbenti, tipicamente ad $r > 4$ m. Inoltre, a parità di capacità di deflessione delle tracce cariche, le dimensioni di un sistema solenoidale sono minori rispetto al caso toroidale.

E' stato dunque scelto un lungo solenoide superconduttore (di lunghezza pari a 13 m) con un diametro interno di 5.9m capace di generare un campo magnetico uniforme di 4 T. Il buon rapporto dimensionale (lunghezza su raggio) del solenoide e l'elevato valore di campo magnetico consentono un'efficiente rivelazione dei muoni - compresa la misura del loro momento - fino ad un valore di

pseudorapidità[§] di 2.4. Quindi lo spettrometro a muoni , in definitiva, consiste in un singolo magnete: ciò fa sì che l'architettura del rivelatore sia veramente semplice. Il raggio interno della bobina solenoidale è grande abbastanza per comprendere il sistema di tracciamento interno ed i calorimetri. Il flusso magnetico viene riconvogliato attraverso lo spessore di 1.5m di ferro saturo del “giogo magnetico” il quale a sua volta è equipaggiato con 4 postazioni di camere a muoni. Il “giogo magnetico” è spesso abbastanza da consentire una sicura identificazione dei muoni ed un potente trigger di questi

1.5 Descrizione del rivelatore CMS

Si da in questo paragrafo una breve descrizione di quelli che sono i rivelatori costituenti il detector CMS.

L'apparato CMS (Figura 1.2), lungo circa 22 m, con diametro di 14.6 m e peso di 14500 tonnellate, si sviluppa secondo una simmetria cilindrica intorno al punto di intersezione dei fasci ed è costituito da diversi rivelatori alloggiati l'uno all'interno dell'altro. Partendo dall'interno verso l'esterno si distinguono: un sistema di tracciamento (Tracker) che circonda il canale del fascio (beam pipe) sulla zona di interazione, un sistema calorimetrico, un magnete superconduttore, un sistema di rivelazione di muoni. Le parti del rivelatore parallele all'asse del fascio sono chiamate barrel o centrali e sono costituite da superfici cilindriche, mentre quelle perpendicolari al fascio sono dette endcap o laterali e sono costituite da superfici piane a forma di disco.

[§] Per la descrizione del rivelatore è stato scelto un sistema di riferimento in cui l'asse z risulta coassiale all'asse di simmetria della macchina e l'angolo polare, indicato con ϑ , è quello formato dalla direzione delle particelle emesse rispetto al fascio principale. Spesso invece dell'angolo ϑ si preferisce impiegare la pseudorapidità definita come

$$\eta = -\ln \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2}$$

Il sistema di coordinate cartesiano utilizzato ha l'asse Z diretto secondo la direzione dei fasci, l'asse X che punta verso il centro dell'anello di accumulazione e l'asse Y che punta verso l'alto. Diamo a seguito una breve descrizione dei sottorivelatori.

1.5.1 Componenti del rivelatore CMS

Il Tracker è il sistema di rivelazione più vicino al punto di interazione. I principali scopi fisici sono: la ricostruzione delle tracce di particelle cariche, la ricostruzione dei vertici primari, l'identificazione dei leptoni insieme al sistema di muoni e dei calorimetri, la ricostruzione di vertici secondari per individuare il mesone B nell'evento e la rilevazione di decadimenti τ .

Il sistema è costituito da due sottosistemi in due gusci cilindrici coassiali. La parte più interna è fatta da rivelatori a pixel di silicio che forniscono una buona precisione nella ricostruzione dei vertici primari. La parte intermedia e quella esterna è fatta di rivelatori di silicio a microstrip che permettono una efficiente ricostruzione della traccia, una misura precisa dell'impulso grazie alla buona risoluzione spaziale e una buona corrispondenza con i rivelatori più esterni.

L'alta densità delle tracce previste ad LHC richiede rivelatori altamente segmentati. Poiché la densità delle tracce è maggiore negli strati più interni, la granularità dei rivelatori aumenterà con il diminuire della loro distanza dalla beam pipe. Per ottenere una buona ricostruzione della traccia e una buona risoluzione del momento trasverso è richiesto ai rivelatori un gran numero di canali di lettura. La quantità di materiale attraversato dalle particelle (material budget) dovrà essere la più bassa possibile onde evitare interazioni secondarie e conversioni che altererebbero le prestazioni del tracciamento. Come conseguenza della sezione d'urto totale e dell'alta luminosità, i livelli di radiazione previsti per il sistema tracciante sono molto più alti rispetto ai precedenti esperimenti. Per sopravvivere a questi ambienti sia la parte sensibile del rivelatore che l'elettronica di lettura devono essere fatte con una tecnologia resistente alla radiazione.

Infine tutti i rivelatori del Tracker devono avere un buon tempo di risoluzione al fine di distinguere gli eventi che provengono da bunch crossing consecutivi.

Per soddisfare a queste richieste il Tracker è costruito con rivelatori al silicio in quanto il loro impiego assicura le prestazioni richieste in termini di risoluzione spaziale (fino a pochi μm), rapidità di risposta (dell'ordine di 10 ns) e tolleranza alle alte dosi di radiazione.

1.5.2 Il sistema calorimetrico

Il sistema calorimetrico è costituito da un calorimetro elettromagnetico (ECAL) ed uno adronico (HCAL) che assorbono completamente le particelle che interagiscono in essi e ne misurano l'energia.

Il calorimetro elettromagnetico è costituito da cristalli di tungstato di piombo (PbWO_4) che offrono le migliori prestazioni per l'identificazione e la misura accurata dell'energia di fotoni ed elettroni in condizioni di intenso campo magnetico ed elevata dose di radiazioni, e con tempi di risposta brevi (10 ns). Il calorimetro elettromagnetico riveste un'importanza particolare per la ricerca del bosone di Higgs, in particolare nel caso in cui si considera il decadimento del bosone di Higgs in due fotoni (canale di decadimento più probabile) o quattro elettroni.

I calorimetri adronici sono invece realizzati alternando strati di materiale assorbente in ottone a strati di scintillatori (4 mm).

1.5.3 Il magnete

Il sistema calorimetrico insieme a quello tracciante è alloggiato in un magnete costituito da un solenoide lungo 13 m con un diametro interno di 2.95 m che sarà capace di produrre un campo magnetico di 4 T, parallelo alla direzione dei fasci di protoni collidenti e che spingerà le particelle

cariche, risultanti dalle collisioni p-p su traiettorie elicoidali tali da consentire misure precise del loro momento.

1.5.4 Il sistema di muoni

La parte esterna di CMS è costituita dal rivelatore per muoni , composto da quattro "stazioni" centrali e otto (quattro per parte) laterali, che costituiscono il barrel e gli endcap rispettivamente. Le stazioni sono intervallate da strati di ferro dolce che fungono da giogo per il ritorno del campo magnetico del solenoide. Ogni stazione consta di quattro piani di tubi a drift (DT chambers) nella parte del barrel e di camere multifili negli endcap utilizzati per la costruzione delle tracce; gli strati sensibili saranno equipaggiati anche con camere a piatti piani resistivi (RPC) che, in virtù della loro elevata velocità di risposta (circa 1 ns) saranno utilizzate per generare il segnale di trigger di primo livello. Lo scopo del sistema dei muoni sarà quello di identificare i muoni ed insieme alle informazioni del rivelatore di vertice, fornire una misura precisa del loro impulso.

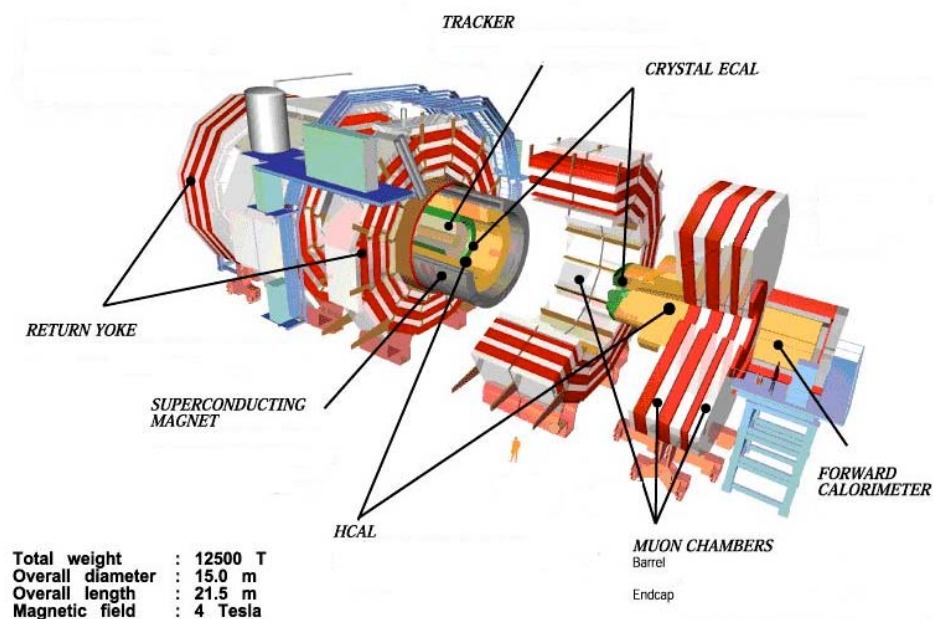


Figura 1.3 Schema d'insieme che mostra i rivelatori che compongono il Compact Muon Solenoid

Capitolo 2

Il Rivelatore ad RPC

2.1 Il materiale di cui sono fatti gli RPC: la bachelite

Le materie plastiche sono sostanze organiche con pesi molecolari molto alti (10^4 - 10^7) che si ottengono per unione di molecole più semplici di basso peso molecolare.

Le molecole di un polimero possono essere catene lineari, ramificate o intrecci tridimensionali.

I polimeri vengono classificati in:

- termoplastici o termoindurenti
- di addizione o di condensazione

I polimeri di addizione si ottengono per unione di monomeri aventi nella loro molecola uno o più doppi o tripli legami.

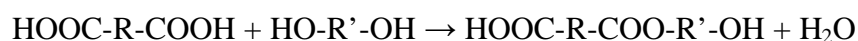
I polimeri di condensazione si ottengono da monomeri la cui molecola contiene due o più gruppi funzionali uguali o diversi, quali il gruppo alcolico (-OH), il gruppo carbossilico (-COOH) e il gruppo amminico (NH_2).

Se nella preparazione si utilizza un solo monomero, questo deve presentare più gruppi funzionali.

Cioè la molecola del monomero deve essere del tipo:



Le reazioni di polimerizzazione vengono condotte in presenza di catalizzatori (acidi o basi) e portano all'eliminazione di acqua. Per esempio, la formazione di un poliestere avviene secondo il seguente schema:



La “bachelite”, impropriamente così chiamata, utilizzata per la costruzione dei rivelatori ad RPC, è un laminato plastico ottenuto imbevendo fogli di carta più o meno comune in diversi tipi di resine.

I laminati plastici vengono prodotti utilizzando resine melamminiche e fenoliche. La struttura è schematizzata nella seguente figura:

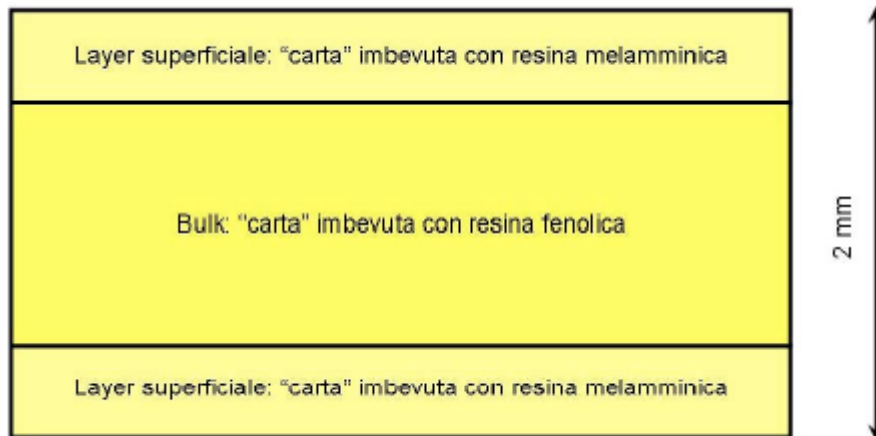


Figura 2.1 Sezione del pannello di “bachelite”

E’ stato detto che il laminato plastico con cui sono costruiti gli RPC è erroneamente definito come bachelite. In realtà la bachelite vera e propria è la resina utilizzata nel processo di laminazione con il quale sono prodotte le lastre che poi andranno a formare le gaps.

La produzione delle resine fenoliche avviene a partire da fenolo e formaldeide. La formazione dei prodotti è influenzata da vari fattori, quali temperatura, rapporto fenolo/formaldeide, pH ecc...

Variando questi parametri si possono ottenere sia resine termoplastiche che termoindurenti.

In ambiente acido con rapporto fenolo /formaldeide > 1 si ottiene un prodotto lineare e termoplastico denominato novalacca (fig. 2.2)

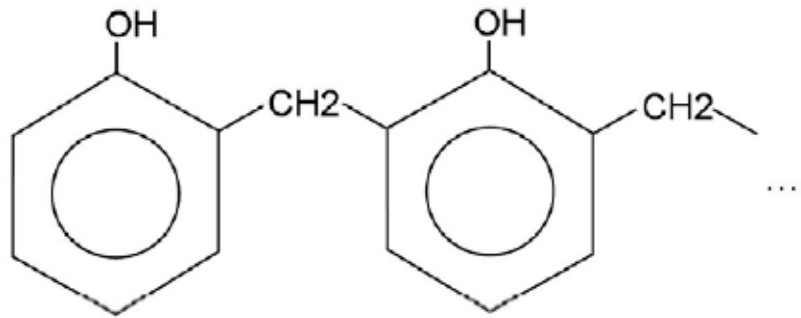


Figura 2.2 Formula di struttura della novalacca

Se la novalacca viene scaldata in presenza di altra formaldeide si ottengono polimeri tridimensionali e termoindurenti.

In ambiente acido, invece, con eccesso di formaldeide rispetto al fenolo si ottengono polimeri complessi suddivisi in tre classi:

- bachelite A o resolo (simile alla novalacca)
- bachelite B o resitelo
- bachelite C o resite

La bachelite B è utilizzata come polvere da stampaggio per pannelli. La resite non fonde e non è solubile (fig 2.3)

Nella produzione dello strato di bulk dei pannelli impiegati nella costruzione dei rielatori RPC, l'ambiente basico viene ottenuto aggiungendo NaOH.

Il layer superficiale dei pannelli è invece costituito da carta imbevuta con resina melamminica.

Le resine melamminiche appartengono al gruppo degli amminoplasti. Le resine di questo gruppo si ottengono per reazione di gruppi amminici con aldeidi. Per il materiale di costruzione degli RPC la reazione avviene tra la melammina e la formaldeide.

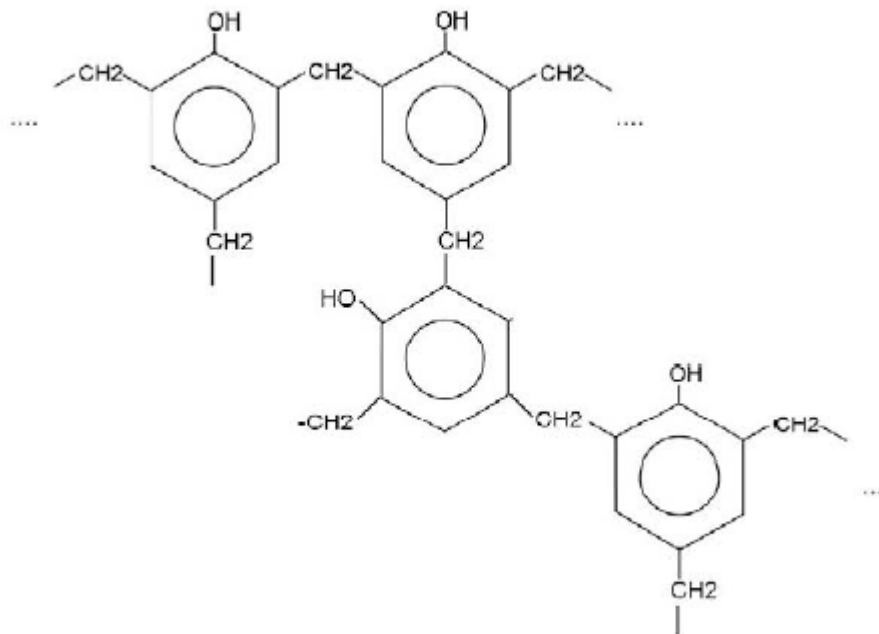
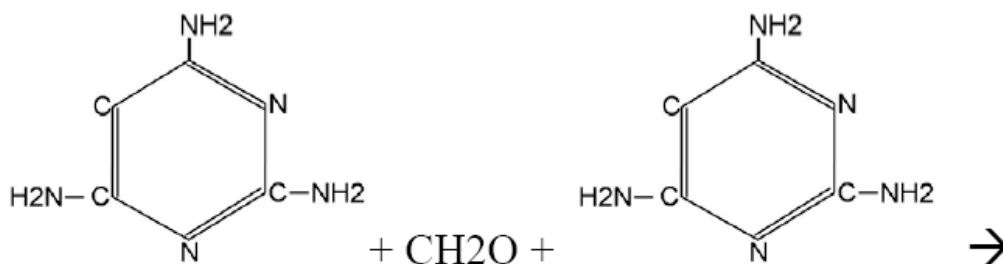


Figura 2.3 Formula di struttura della bachelite B

La struttura delle resine melamminche e la loro reazione di polimerizzazione sono schematizzate in fig 2.4.



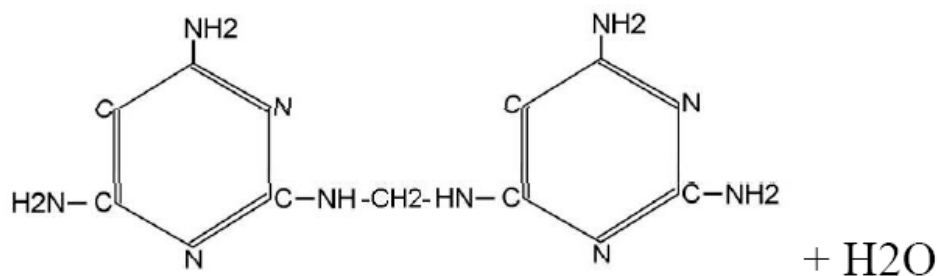


Figura 2.4 Reazione di polimerizzazione delle resine melamminiche

Nella produzione delle resine melamminiche non viene utilizzato alcun catalizzatore specifico. Talvolta viene impiegato un “accelerante” di natura organica, cioè composto solamente da C, H e O

2.2 Descrizione del rivelatore RPC

Nella sua configurazione più semplice un RPC è costituito da due elettrodi piani e paralleli, tra i quali è imposta una differenza di potenziale. Gli elettrodi sono realizzati con un materiale con resistività volumetrica $10^{10} - 10^{11} \Omega \text{ cm}$, generalmente bachelite, e hanno spessore di circa 2 mm.

Nella regione tra i due elettrodi viene stabilito un campo elettrico uniforme ed intenso. La gap è riempita da una miscela gassosa, che costituisce l'elemento sensibile del rivelatore.

La distanza tra gli elettrodi è mantenuta costante mediante cilindretti di cloruro di polivinile (spacers) aventi diametro di 1 cm e resistività volumetrica superiore a $10^{13} \Omega \text{ cm}$. Gli spaziatori sono disposti secondo una maglia reticolare $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Le due piastre che costituiscono la gap sono collegate una all'alta tensione e l'altra a massa. Per rendere uniforme il campo elettrico generato, data la non conducibilità della bachelite, i lati esterni della gap vengono rivestiti di un sottile strato di grafite.

I segnali elettrici generati dal passaggio di una particella ionizzante sono raccolti capacitivamente da elettrodi metallici esterni. L'elevata resistività dell'anodo, infatti, limita l'accumulazione della carica indotta sull'elettrodo.

Poiché anche la resistività della grafite è sufficientemente alta, il sistema risulta trasparente agli impulsi di corrente generati dalle scariche che hanno luogo nel gas.

Gli elettrodi di lettura sono strisce di rame (strip) di larghezza 3 cm, isolati dagli strati di grafite mediante un foglio di polietilene di spessore 0.03 mm.

Le strip si comportano come linee di trasmissione con impedenza caratteristica di 50Ω , caratterizzate da un ritardo di propagazione del segnale di 5.5 ns/m.

La lettura dei segnali può avvenire su entrambe le facce del rivelatore e in direzioni ortogonali per permettere di ottenere informazioni relative a due coordinate.

Il segnale sulle strip di lettura può essere rafforzato sovrapponendo più camere. In questo modo viene letta la somma dei segnali generati da ciascuna camera ottenendo un'efficienza che è l'OR logico delle singole efficienze e data da:

$$\varepsilon = \varepsilon_1(1 - \varepsilon_2) + \varepsilon_2(1 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1\varepsilon_2$$

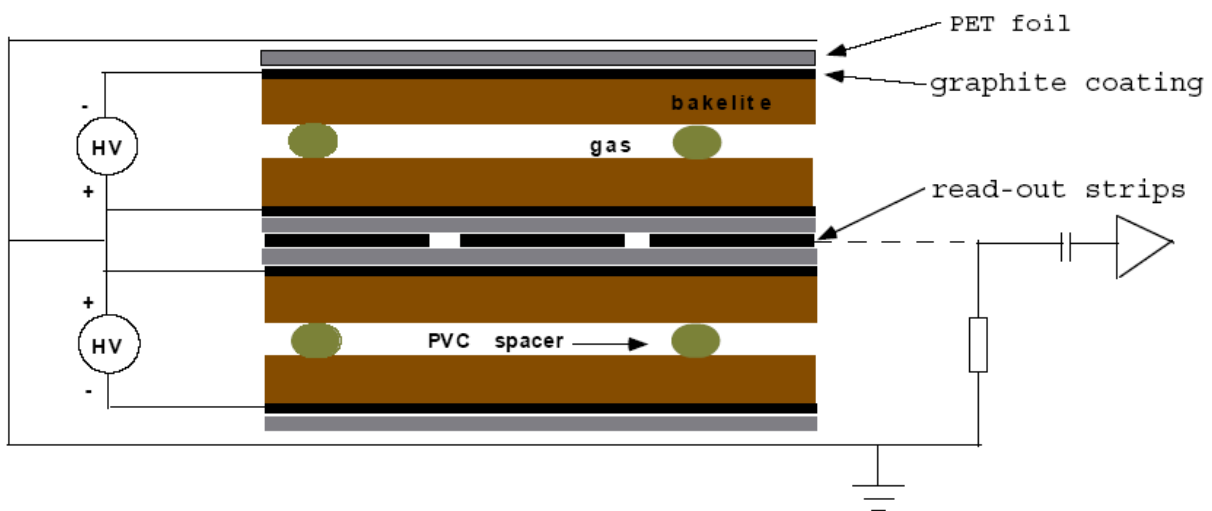


Figura 2.5 vista in sezione di una doppia gap

La configurazione proposta per l'esperimento CMS è quella in fig. 2.5, detta a doppia gap, nella quale vengono sovrapposte due camere indipendenti. Gli elettrodi di lettura sono posti tra i due rivelatori, quindi possono essere sensibili ai fenomeni di ionizzazione che avvengono in uno qualunque dei due.

I piani di grafite sono isolati con due sottili strati di mylar e l'intero sistema è ricoperto con un foglio di rame che funge da schermo elettrostatico. Il rame, inoltre, fornisce il potenziale di massa sia alle resistenze di terminazione delle strip che all'elettronica.

2.3 Principi di funzionamento

La formazione del segnale elettrico in un RPC, come in tutti i rivelatori gassosi, si basa sul processo di moltiplicazione degli elettroni.

Questo processo può essere caratterizzato dal coefficiente effettivo di ionizzazione $\eta = \alpha - \beta$, pari alla differenza tra α , primo coefficiente di Townsend, che rappresenta il numero di ionizzazioni prodotte dall'elettrone per unità di lunghezza, e il coefficiente di attaccamento β , che misura il numero di elettroni catturati per unità di lunghezza dalle molecole di gas.

Il fattore di moltiplicazione o guadagno del gas M , definito come il rapporto tra il numero n di elettroni prodotti a partire da un cluster primario di n_0 elettroni e n_0 , risulta infatti dato da:

$$M = \frac{n}{n_0} = e^{\eta x}$$

Si ha quindi una moltiplicazione esponenziale delle coppie primarie prodotte dal passaggio di una particella ionizzante nel gas, ossia la produzione di una valanga.

Con guadagni elevati del gas, pari a 10^8 , il campo elettrico associato alla distribuzione di carica spaziale della valanga scherma il campo impostato tra gli elettrodi, favorendo la ricombinazione delle coppie elettrone-ione.

I fotoni emessi in questi processi ionizzano il gas ed estraggono fotoelettroni dal catodo, liberando così nuovi elettroni che generano nuove valanghe, fino a che si ha la formazione di un canale di

plasma o *streamer*** che causa la scarica tra gli elettrodi, la quale può interessare ampie regioni della camera.

In questo regime di funzionamento, sugli elettrodi di lettura di un RPC viene indotto un segnale corrispondente ad una quantità di carica dell'ordine dei 100 pC.

Per limitare l'innescarsi del processo di *streamer* si sceglie di limitare il guadagno della camera a valori non superiori a $M \approx 10^6$, trasferendo parte del fattore di amplificazione all'elettronica di lettura.

Le camere che saranno impiegate nell'esperimento CMS opereranno nel regime detto *avalanche*, cioè con guadagno tale da soddisfare la condizione di Raether $\eta d < 20$, nella quale d rappresenta lo spessore della gap, quindi la massima distanza percorsa dagli elettroni, prodotti nei processi di ionizzazione, nella loro deriva verso l'anodo.

In questo regime la probabilità che la moltiplicazione secondaria dia luogo alla formazione dello *streamer* risulta limitata. La quantità di carica totale prodotta mediamente nel gas, in queste condizioni, viene ridotta e quella corrispondente al segnale indotto sugli elettrodi di lettura risulta dell'ordine di 1 pC. In questo modo viene migliorata la capacità del rivelatore di funzionare efficientemente con alti flussi di particelle incidenti ($>100 \text{ Hz/cm}^2$).

Il modello di formazione della carica nella gap di un RPC è illustrato in fig. 2.6. Il segnale utile è costituito dalla carica q_e indotta durante la deriva della carica elettronica Q_e verso l'anodo. Nel circuito esterno alla gap l'alimentatore deve spostare la carica q_s per compensare quella raccolta sugli elettrodi.

L'alta resistività della bachelite determina un abbassamento temporaneo del campo elettrico nella regione interessata dalla scarica. La grande differenza tra il tempo di durata della scarica, pari a 10

** La streamer ha il vantaggio di generare un segnale più ampio rispetto a quello dell'avalanche. Tuttavia come nel caso dell'avalanche bisogna ricordare che esso ha l'effetto di scaricare localmente gli elettrodi. A causa di ciò la regione attorno alla traiettoria della particella ionizzante diventa "cieca" per un tempo pari al tempo di ricarica. L'area degli elettrodi soggetta a scarica è proporzionale alla carica generata e così è molto più grande nel caso dello streamer. Quindi se si vuole lavorare ad elevati "rates" bisogna evitare di lavorare in tale regime. E' stato mostrato che si possono ottenere buoni risultati anche operando in regime di avalanche dove la carica generata è dell'ordine della decina di pC. La soppressione dello streamer, come è ottenuta utilizzando nella miscela dei gas di "quenching"

ns, e il tempo di rilassamento degli elettrodi resistivi, τ , che risulta dell'ordine della decina di millisecondi, assicura che venga interessata solo una zona limitata attorno al punto in cui è avvenuta la scarica stessa. La superficie del rivelatore resa inattiva dal processo di scarica risulta inoltre proporzionale alla carica totale nel gas, come indica l'espressione della capacità di un condensatore piano.

Un rivelatore con elettrodi piani e resistivi può quindi essere considerato come un insieme di tante piccole celle di scarica.

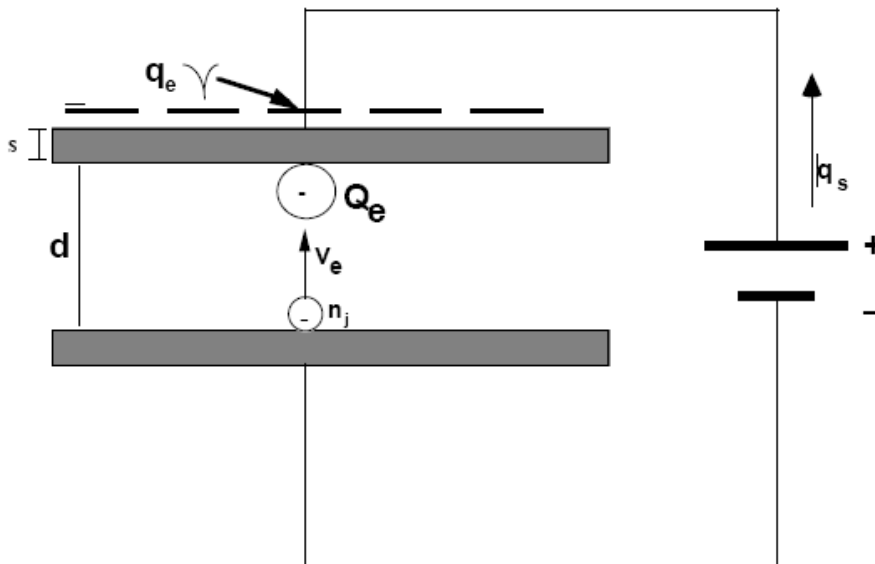


Figura 2.6 Modello di formazione della carica in un RPC

La resistività degli elettrodi quindi determina il tempo morto del rivelatore. La costante di tempo della cella elementare del rivelatore interessata dallo sviluppo di una valanga, infatti, risulta minore per resistività più basse. E' necessario quindi scegliere opportunamente il valore di questa grandezza per ottenere un comportamento efficiente della camera in presenza di flussi elevati di particelle.

Un altro parametro fondamentale che caratterizza gli elettrodi è la levigatezza superficiale della superficie a contatto col gas. Le imperfezioni a livello microscopico infatti aumentano la probabilità di impulsi spuri che potrebbero ulteriormente influire sul comportamento in presenza di flussi elevati. Questa caratteristica viene studiata misurando la *rugosità*, definita come la deviazione della superficie dal suo profilo medio.

Per migliorare la qualità della superficie degli elettrodi viene effettuato un loro trattamento con olio di lino.

Relativamente alle miscele gassose, il parametro che influenza le prestazioni del rivelatore è la densità di cluster λ , cioè il numero di clusters primari costituiti da coppie elettrone ione prodotte da una particella carica nel gas per unità di lunghezza. In generale valori elevati di questa grandezza permettono di massimizzare il segnale e ottenere una buona efficienza.

Sono state confrontate le prestazioni di camere riempite con miscele a base di freon ($\lambda \approx 5$ clusters/mm), e a base di argon ($\lambda \approx 2.5$ clusters/mm) e si è verificato che per queste ultime non è possibile ottenere efficienze elevate senza che aumenti la probabilità di formazione di uno *streamer*. Con flussi estremamente elevati la corrente che scorre attraverso i piani resistivi aumenta dando luogo ad una caduta di potenziale locale sugli elettrodi, proporzionale alla carica prodotta per ionizzazione. In queste condizioni il campo elettrico tra gli elettrodi subisce delle fluttuazioni attorno al valore medio.

Per camere operanti in regime di *avalanche*, nel caso di miscele a base di argon, la carica prodotta mediamente nel gas, quindi la riduzione della tensione effettiva ai capi della gap risulta minore che nel caso di miscele a base di freon. In queste condizioni l'argon consentirebbe una risposta più uniforme, soprattutto in caso di fluttuazioni del flusso incidente, come quelle attese ad LHC. Utilizzando l'argon, tuttavia, non è possibile ottenere una buona efficienza senza che aumenti significativamente la probabilità di *streamer*. La riduzione del valore di efficienza osservato risulta, inoltre, accompagnata da quella della regione di *plateau*. Poiché la quantità di carica prodotta

mediamente nel gas può essere controllata solo in parte, il parametro più interessante per l'ottimizzazione delle prestazioni con alti flussi incidenti risulta la resistività degli elettrodi.

La larghezza della gap, invece, influenza le prestazioni temporali del rivelatore. Si è verificato, infatti, che gap più larghe peggiorano la risoluzione ottenibile a causa delle maggiori fluttuazioni nello sviluppo della valanga, pur migliorando l'efficienza per la maggiore probabilità di produrre coppie elettrone-ione. Il valore 2 mm sembra essere il valore ottimale per la larghezza della gap, consentendo sia una buona efficienza di rivelazione sia una buona risoluzione temporale.

L'utilizzo degli RPC in esperimenti di fisica agli acceleratori è stato sinora limitato dal flusso massimo di particelle ionizzanti che tali rivelatori possono sostenere efficientemente. Il comportamento di questi ultimi in presenza di un'alta rate di fondo è determinato dal valore di resistività degli elettrodi e dalla scelta della miscela di gas.

2.4 Disposizione degli RPC nel detector CMS

La disposizione geometrica degli RPC accoppiati con le DT nel rivelatore CMS è stato pensato in modo da ottimizzare la capacità di rivelazione, riducendo al minimo le aree libere o le zone morte, cioè quelle occupate da materiale non sensibile.

Si riporta nella figura seguente una delle ruote del detector CMS. Ciascuna ruota è suddivisa in dodici settori.

Nelle stazioni MB1 ed MB2 l'accoppiamento è di tipo sandwich, con una DT tra due RPC. Invece nei settori MB3 ed MB4 l'accoppiamento è di una DT con una doppia gap RPC, con l'RPC posto all'esterno della DT, come mostra l'ingrandimento sulla sinistra.

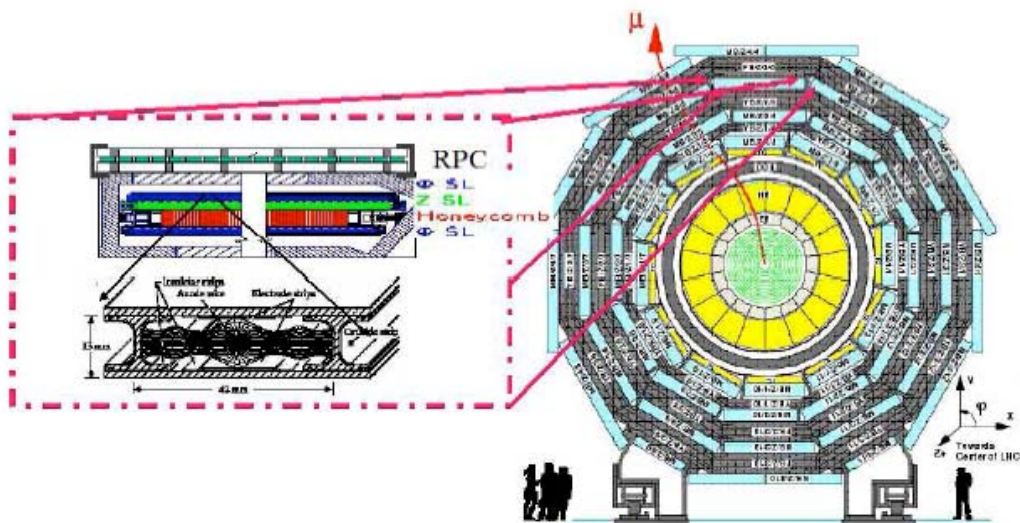


Figura 2.7 Rappresentazione di una delle “ruote” del rivelatore. Si nota il barrel e le camere RPC in esso contenute

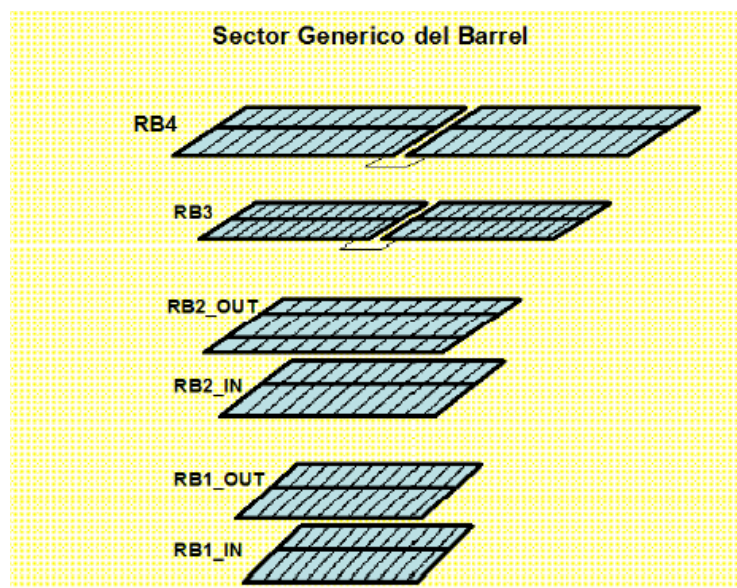


Figura 2.8 Geometria delle camere in un dei 12 settori in cui è suddivisa una ruota

La lunghezza delle strip negli RPC è di circa 120 cm nei rivelatori composti da due doppie gap e di 80 cm nei rivelatori con tre doppie gap. Le doppie gap presenti nei rivelatori sono chiamate *forward* e *backward* e nel caso di quelli con tre doppie gaps, *middle*.

Sono presenti poi anche camere nelle end-caps e data la geometria di queste ruote di “chiusura” esse hanno forma trapezoidale e le strip sono disposte radialmente.

Capitolo 3

GAS GAIN MONITORING SYSTEM e suo set-up presso i LNF dell'INFN

3.1 Introduzione

Il monitoring della miscela di gas è di estrema importanza in tutti i grandi rivelatori per muoni utilizzando camere ad RPC. Variazioni accidentali delle percentuali relative dei componenti della miscela gassosa, la presenza di inquinanti non noti o un errato tasso di umidità possono comportare una immediata variazione del punto di lavoro delle singole camere compromettendo così il loro corretto funzionamento e la loro possibilità di rivelazione riducendone l'efficienza.

A tal riguardo presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare è stato progettato un sistema di gas monitoring per il controllo "real time" del punto di lavoro.

Ad ora, il sistema è in fase di realizzazione e si stanno facendo le opportune prove di calibrazione di tutti gli apparati costituenti.

3.2 Conceptual design

La progettazione di un tale sistema di controllo di qualità della miscela gassosa richiede particolari attenzioni su alcuni punti cruciali. Innanzitutto la sua caratteristica principale deve essere quella di fornire una risposta temporale molto più veloce rispetto agli RPC installati su CMS, il che si traduce in una sensibilità molto spinta del sistema stesso. In tal maniera si potrà essere in grado di lanciare un warning in tempo utile per prendere tutti gli accorgimenti del caso.

Il sistema dovrà essere in grado poi di monitorare in maniera continua la carica e l'efficienza utilizzando come sorgente di radiazione quella cosmica. Si avrà così, utilizzando delle pad 35x 35 cm² un rate di 20 Hz/pad. Utilizzando pad di queste dimensioni e conteggiando gli eventi ogni dieci minuti si avranno come ordine di grandezza 10⁴ eventi. L'errore sarà perciò:

$$\frac{1}{\sqrt{N}} = 0,01$$

E quindi dell'ordine del punto percentuale.

Per far ciò verranno installati tre sottosistemi che andranno a costituire il telescopio ad RPC. Ogni singola gap avrà delle pad 35x35 cm² affinché il rate nominale sia quello indicato sopra. Il dettaglio progettuale del sistema è riportato in fig. 3.1.

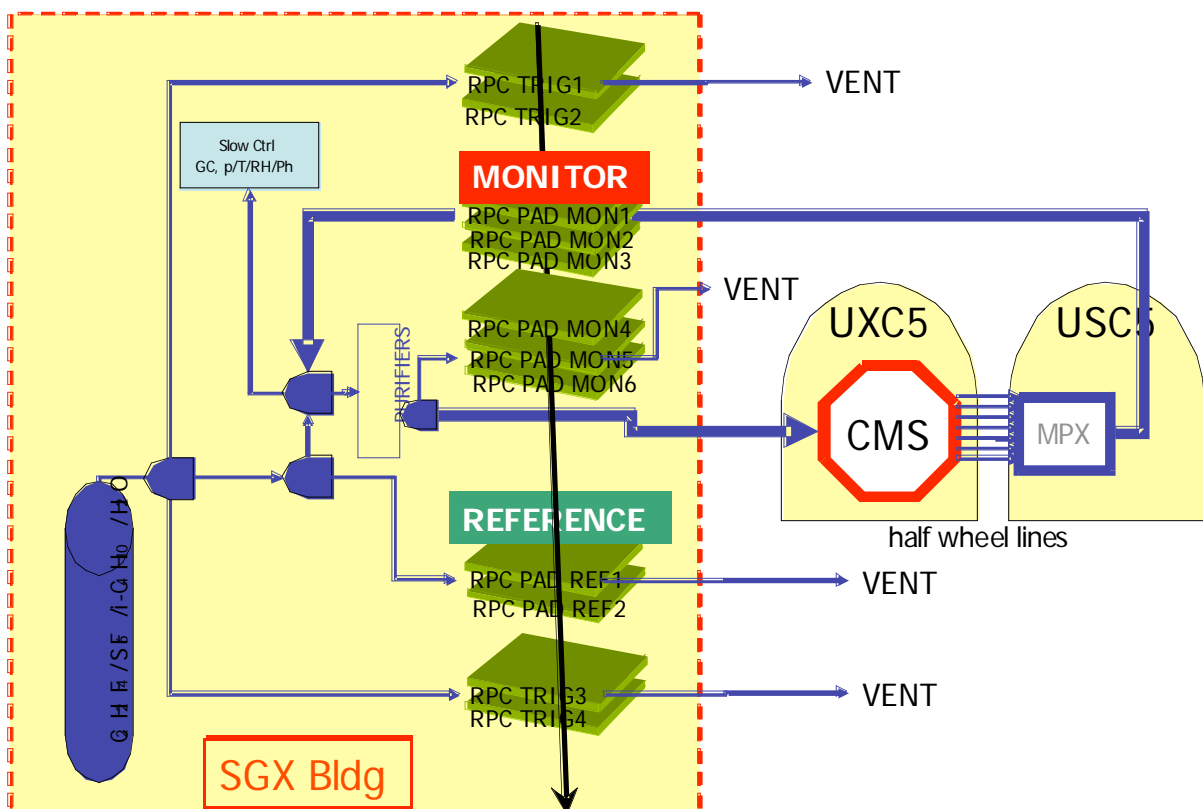


Figura 3.1 Disegno concettuale del sistema di Gas Gain Monitoring System

I tre sottosistemi, volendo appunto controllare lo stato del gas, saranno flussati con miscele di identica composizione nominale ma diversa condizione di utilizzo all'interno dell'esperimento.

Nel dettaglio il primo sottosistema sarà costituito da due coppie di gap flussate in open mode e cioè con miscela "fresca".

Questo perché gli RPC che lo compongono serviranno a fornire la logica di trigger del sistema. A tal proposito le singole gap connesse in coppia sono collegate in logica OR mentre le due coppie

sono collegate in logica AND. Essendo flussate in open mode le gap in questione lavoreranno sempre al massimo dell'efficienza e il loro punto di lavoro non sarà influenzato da variazioni della composizione della miscela gassosa.

Il secondo sottosistema detto "MONITOR OUT" è flussato con gas in uscita dai rivelatori di CMS e collegato quindi al closed loop cycle. Utilizzando come fluido di lavoro lo stesso gas, eventualmente con presenza di inquinanti, flussato in CMS, i rivelatori che lo compongono potranno subire una sensibile diminuzione della loro efficienza.

Il terzo sottosistema detto "MONITOR IN", per concludere, è connesso in serie al closed loop cycle con gas proveniente dai filtri e non ancora passato in CMS. Una sua eventuale riduzione di efficienza di rivelazione sarà in grado di dare un warning circa il non più corretto funzionamento dei filtri e quindi di segnalare la necessità della loro rigenerazione o sostituzione. In più quest'ultimo sottosistema sarà anche in grado di rivelare la presenza di inquinanti non noti e quindi non opportunamente bloccati dai filtri in uso ma tali comunque da provocare una persistente perdita di efficienza indipendente dallo stato dei filtri stessi.

Se i fondi lo permetteranno, una proposta interessante avanzata di recente è stata quella di fornire l'intero sistema di un dispositivo multiplexer in grado di selezionare il gas proveniente da ciascuna singola semiruota, il quale può essere così analizzato nel dettaglio fornendo chiare indicazioni sul funzionamento non solo dell'intero rivelatore ma anche delle sue singole parti costituenti.

Il tutto troverà sistemazione negli edifici indicati nella fig. 3.1. In particolare, come già detto precedentemente il rivelatore CMS verrà collocato nella caverna UXC5 mentre il Gas Gain Monitoring System sarà sistemato nel SGX building in superficie. Si pensava invece di installare il multiplexer nella caverna USC5.

A complemento di questo dispositivo di controllo, la sezione INFN dell'Università di Bari sta allestendo un sistema di controllo diretto della qualità della miscela gassosa che a differenza di quello appena descritto non si basa sulla variazione dell'efficienza di rivelazione ma su misure dirette delle grandezze chimico-fisiche della miscela. Nello specifico il Gas Qualità Monitoring

System sarà installato immediatamente a valle dei filtri e prima dell'ingresso del gas nel terzo sottosistema del Gas Gain Monitoring System. Esso provvederà a prelevare parte della miscela gassosa e utilizzando un gas cromatografo e sonde di temperatura, pressione e umidità potrà dare valide indicazioni sulla composizione della miscela in ogni istante di funzionamento.

E' importante notare la stretta correlazione che i due sottosistemi potrebbero avere dal momento che le eventuali variazioni di efficienza dei rivelatori RPC del sistema di controllo possono in tal maniera essere "depurate" della loro dipendenza da temperatura e pressione.

E' comunque possibile spostare tale sistema in altre parti del circuito del gas qualora lo si reputasse necessario, per studiare la chimica in zone differenti e per capire dove eventualmente si formino gli inquinanti che determinano la caduta di efficienza del rivelatore.

3.3 Realizzazione di un primo prototipo

Da marzo 2006 i Laboratori Nazionali di Frascati sono al lavoro per la realizzazione del Gas Gain Monitoring System. Preliminarmente però si è provveduto a prendere confidenza con il rivelatore RPC e con il set-up di tutta la componentistica necessaria al suo corretto funzionamento. E' stata così ordinata alla General Tecnica di Colli (FR) una prima gap di 50x50 cm² da utilizzare per il set-up di un primitivo sistema di rivelazione utile alla messa a punto della definitiva configurazione dell'apparato da installare poi al CERN.

La prima configurazione ha previsto l'incollaggio, sui due lati della gap, di una pad 35x35 cm² sul lato connesso all'HV e di un foglio con 10 strip di 2 cm di spessore sul lato connesso a massa. Dopo tale operazione la pad e le strip sono state ricoperte con un foglio di isolante e la gap è stata integralmente rivestita con un foglio di rame connesso a massa per realizzare l'isolamento elettrico.

Gli ugelli sono stati connessi a tubicini di polietilene. Pronti per essere collegati al circuito del gas.

Le singole strip del lato connesso a massa sono state collegate alla massa per mezzo di resistenze di 50 Ω per realizzare l'adattamento delle linee dei segnali. All'estremità opposta di ciascuna strip

sono stati saldati dei pezzetti di conduttore per predisporli alla connessione per il prelievo del segnale in uscita. Per questa prima configurazione il segnale in uscita è stato prelevato da una sola strip.

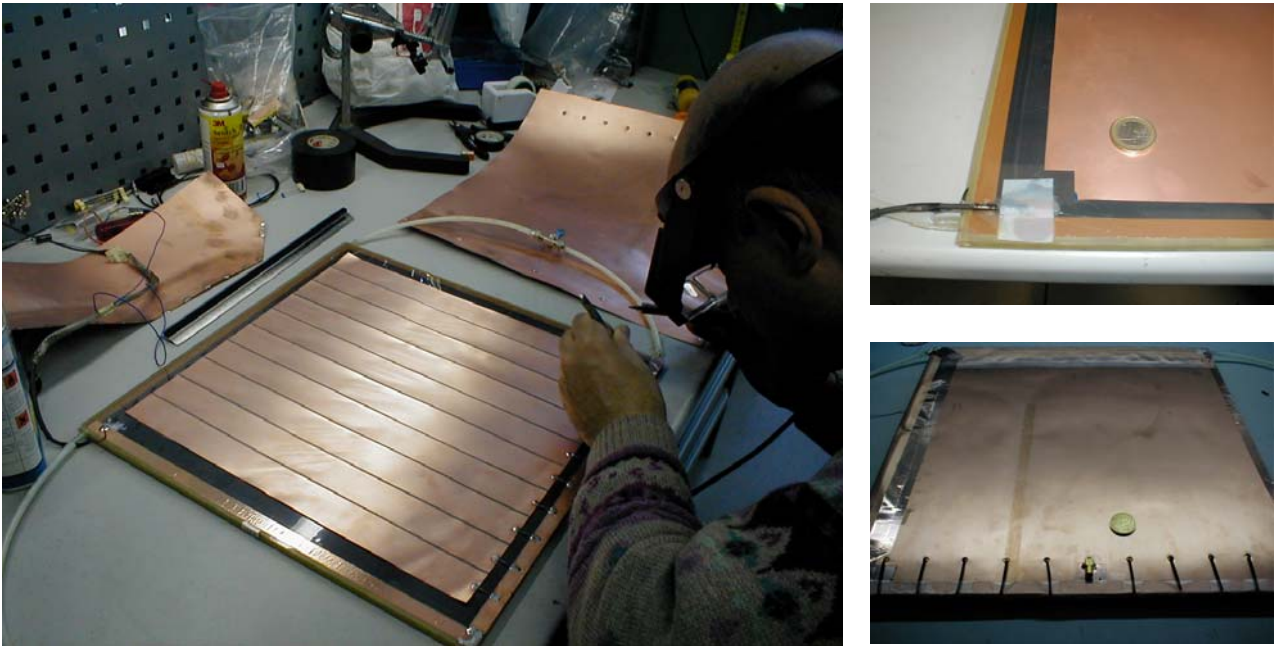


Figura 3.2 Preparazione della gap

Il segnale sulla pad viene invece prelevato al centro della pad stessa. E' chiaro che un primissimo problema di questa prima configurazione sarà il basso rate di eventi se si utilizzano i cosmici come sorgente di radiazione. Ciò è essenzialmente dovuto al basso angolo solido sotteso dalla pad e da una singola strip. Tale problema è però risolto nel momento in cui venga utilizzata una sorgente a radioisotopi per generare il segnale o se si preleva il segnale da tutte e 10 le strip.

L'RPC viene flussato in open mode in quanto al momento non è ancora stato possibile installare il sistema di filtri per poter operare in closed loop. Questo comporta un maggiore spreco di gas ma permette una maggiore versatilità e facilità di studio almeno in questa prima fase di messa a punto.

Le portate dei tre singoli gas componenti la miscela sono regolate per mezzo di flussimetri Bronkhorst opportunamente tarati per mezzo di un bubbolatore.

3.3.1 Il punto di lavoro

Il punto di lavoro è la condizione ottimale e maggiormente stabile in cui deve trovarsi il sistema di rivelazione durante tutto il corso dell'acquisizione dati. La ricerca di tale punto di lavoro consiste nel determinare i valori di alcune grandezze regolabili esternamente, quali la composizione percentuale della miscela gassosa e la tensione di lavoro. E' importante sottolineare che tale condizione non sarà mai del tutto stabile, trovandosi essa a dipendere dai parametri ambientali.

3.3.2 Taratura dei flussimetri

L'apparato sperimentale per la taratura dei flussimetri è costituito da un cilindro di vetro graduato da 50 ± 2 cc, dotato di tre aperture: una verso l'alto e due verso il basso. La prima è collegata ad un tubo d'uscita del flussometro da tarare, l'altra è attaccata ad una pompetta in lattice contenente acqua saponata.

Il procedimento di taratura consiste nel creare una lamella di acqua saponata mediante l'apposita pompetta (da qui il nome di bubbolatore per il dispositivo) e misurare il tempo che essa impiega a percorrere un tratto arbitrario del cilindro graduato, spinta verso l'alto dal flusso del gas in esame, regolabile attraverso il flussometro. La misura è stata svolta facendo variare la percentuale del fondo-scala impostata sul Power Supply e misurando, con un cronometro sensibile al decimo di secondo, il tempo che la bolla impiega a percorrere un tratto di 50 ± 2 cc. Per ricavare le curve di taratura è stato effettuato un fit lineare delle misure ricavate in funzione dell'apertura selezionata sul Power Supply. La relazione utilizzata è la seguente:

$$y = Bx$$

La misura è stata effettuata a partire da tre misure di tempo per ogni setting di apertura. Ricavato il tempo medio tra le tre misure e il valore della deviazione standard della media, si è calcolato il valore del flusso equivalente in litri/ora; la portata volumetrica è data infatti da:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

L'errore relativo ϵ_{rel} sulla misura di portata sarà dato, non essendoci correlazione tra essi, dalla somma in quadratura dei singoli errori sul volume e sul tempo, quindi:

$$\epsilon_{rel} = \frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

Passando dall'errore relativo ϵ_{rel} a quello assoluto ϵ_{ass} , moltiplicando il primo per il flusso equivalente corrispondente, si può definire il peso di ciascuna misura come:

$$w_i = \frac{1}{\epsilon_{ass_i}}$$

e quindi in definitiva effettuare un fit lineare utilizzando il metodo dei minimi quadrati "pesati".

I valori della costanti B del fit sono dati in questo caso dalle seguenti relazioni:

$$B = \frac{\sum_i w_i \sum w_i x_i y_i - \sum_i w_i y_i \sum_i w_i x_i}{\Delta}$$

in cui Δ vale:

$$\Delta = \sum_i w_i \sum_i w_i x_i^2 - \left(\sum_i w_i x_i\right)^2$$

Da ultimo si riportano le relazioni che danno l'incertezza sulla determinazione dei coefficienti A:

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{\sum_i w_i}{\Delta}}$$

Note quindi le espressioni delle curve di calibrazione è possibile ricavare il valore da impostare sul Power Supply per ottenere la percentuale volumetrica di gas voluta nella miscela.

L'errore sul setting impostato sarà dato dalla sensibilità del Power Supply, e nel nostro caso è $\pm 0,1\%$.

Si riportano di seguito le tabelle e i grafici relativi alle calibrazioni dei flussimetri Bronkhorst con i valori dei parametri del fit lineare.

Calibrazione Flussimetro R134A			
Apertura (%)	secondi	L/h	errore (l/h)
0	0	0	0
5	306	0,588	0,002
10	153	1,18	0,01
20	76	2,37	0,03
30	50	3,60	0,07
40	38	4,7	0,1
50	30	6,0	0,2
60	25	7,2	0,3
70	21	8,6	0,4
80	19	9,5	0,5
90	17	10,6	0,6
100	16	11,3	0,7

Tabella 1 Tabella di calibrazione della testina per il tetrafluoroetano

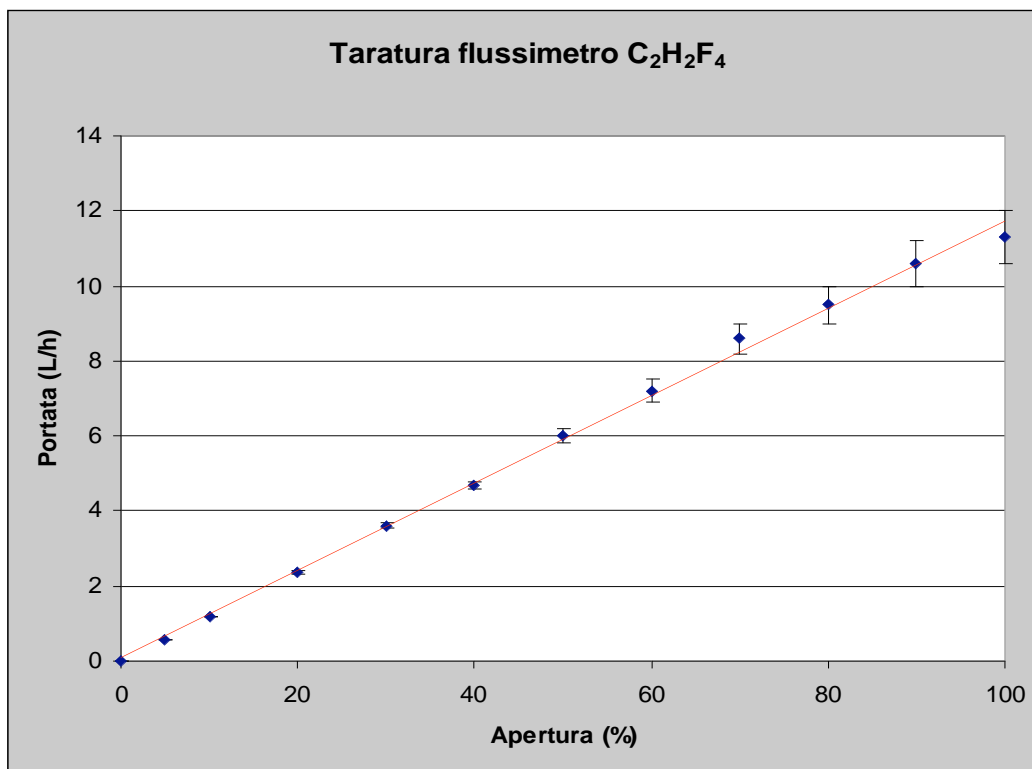


Figura 3.3 curva di taratura della testina per il tetrafluoroetano

Calibrazione Flussimetro Isobutano			
Apertura (%)	secondi	L/h	errore (l/h)
0	0	0	0
10	364	0,495	0,001
20	182	0,989	0,005
30	124	1,45	0,01
40	93	1,94	0,02
50	73	2,47	0,03
60	61	2,95	0,05
70	52	3,46	0,07
80	45	4,00	0,09
90	40	4,5	0,1
100	37	4,9	0,1

Tabella 2 Tabella di calibrazione della testina per l' isobutano

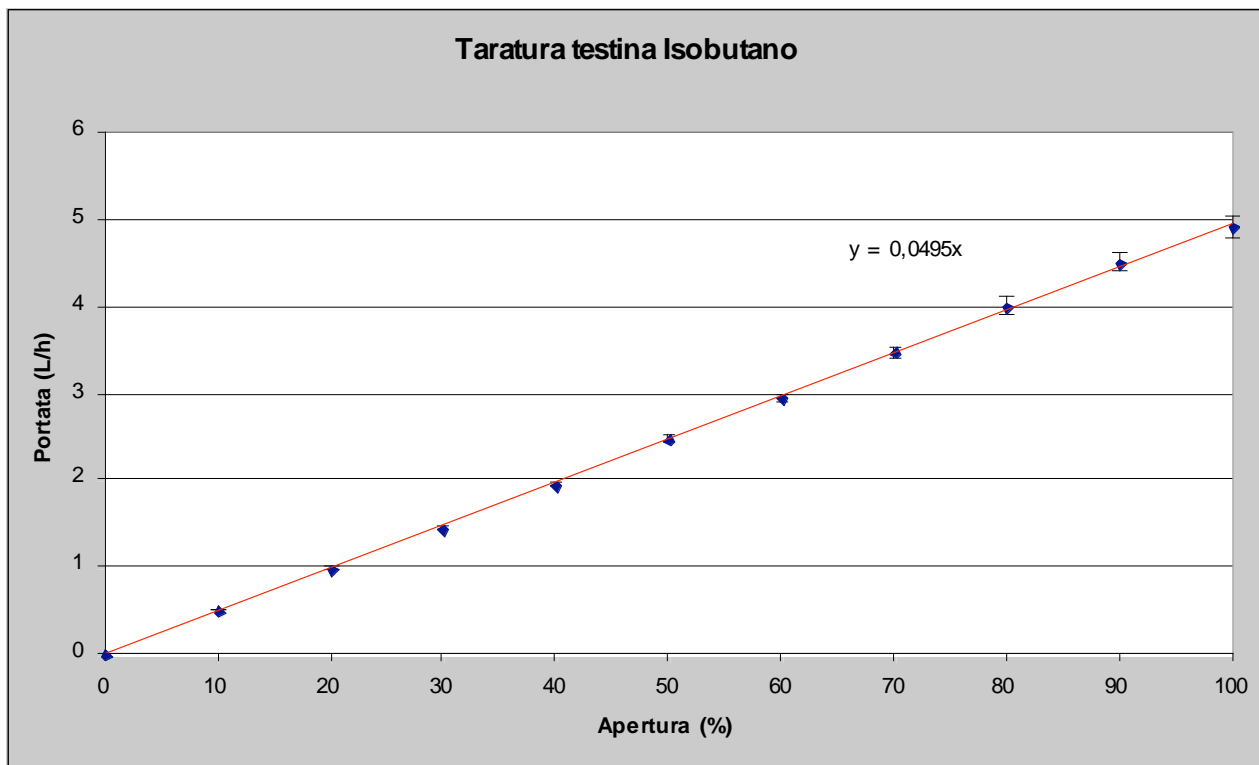


Figura 3.3 curva di taratura della testina per l'isobutano

Calibrazione Flussimetro SF6			
Apertura (%)	secondi	L/h	errore (l/h)
0	0	0	0
10	-----	-----	-----
20	-----	-----	-----
30	-----	-----	-----
40	-----	-----	-----
50	454	0,3965	0,0009
60	379	0,475	0,001
70	325	0,554	0,002
80	284	0,634	0,002
90	252	0,714	0,003
100	228	0,789	0,003

Tabella 2 Tabella di calibrazione della testina per l'esfluorurodi zolfo

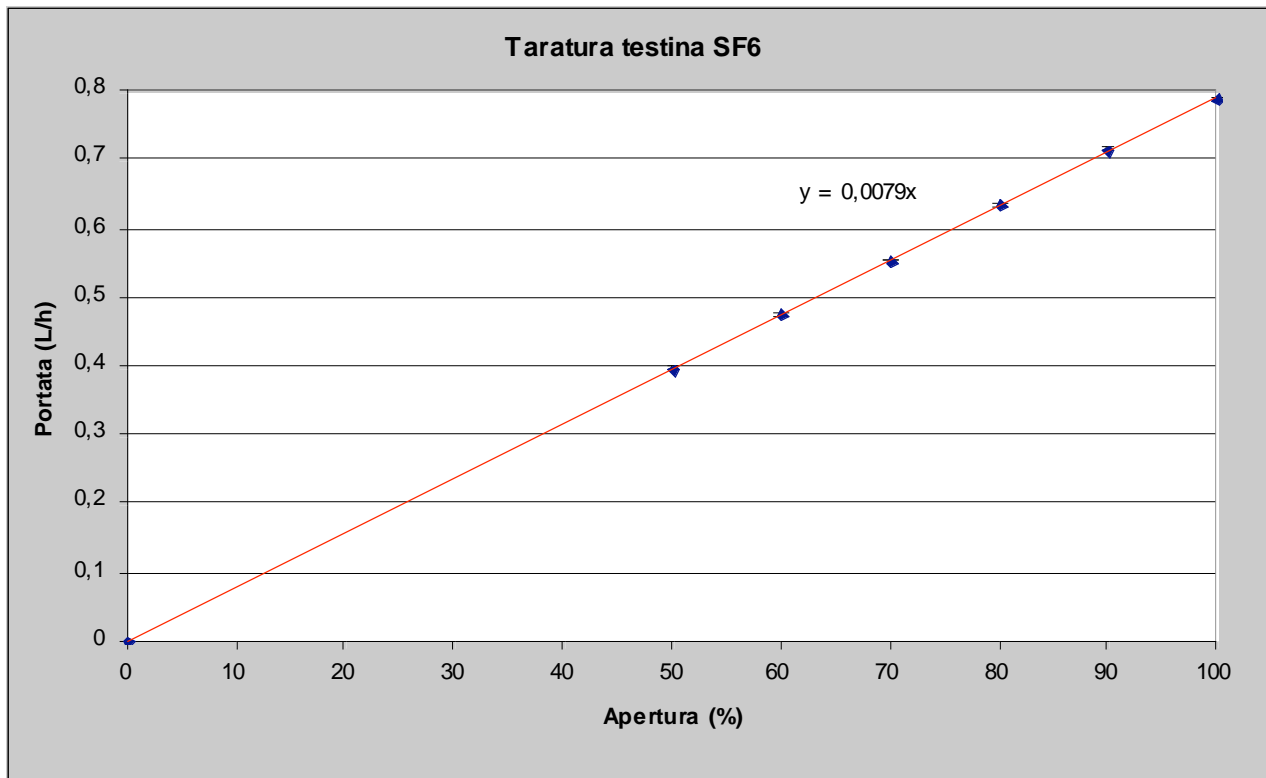


Figura 3.3 curva di taratura della testina per l'isobutano

Una volta quindi ottenute le curve di taratura dei flussimetri fissata la composizione della miscela è possibile ottenere il valore dell'apertura percentuale per i singoli flussimetri di massa da impostare sul power supply.

3.4 Il sistema di trigger

Per realizzare il sistema di trigger si è fatto uso di due scintillatori^{††} posti alla distanza di (XXXcm) uno sopra e uno sotto il tavolo sul quale è poggiata l'RPC.

^{††} I materiali scintillanti esibiscono la proprietà conosciuta come luminescenza. Sollecitati da un'azione esterna (come luce, calore, radiazioni), assorbono e riemettono energia sotto forma di luce visibile. Le scintillazioni prodotte vengono amplificate tramite particolari dispositivi: i fotomoltiplicatori; queste scintillazioni possono essere convertite in segnale elettrico dando informazioni sulla radiazione incidente. In particolare l'intensità della luce di scintillazione è proporzionale all'energia persa dalla particella ionizzante nello scintillatore; perciò questi rivelatori forniscono informazioni sull'energia della particella.

Chiaramente l'efficienza è importante ai fini di un corretto conteggio del rate per il rivelatore RPC e per sapere quanto vale quantitativamente si raffronta il numero di conteggi ottenuti con gli scintillatori con quelli noti in letteratura per la radiazione cosmica a livello del suolo. Per tale confronto bisogna quindi conoscere il valore dell'angolo solido sotteso dai due scintillatori e va conosciuto il punto di lavoro di ciascuno di essi dopo aver tracciato le curve di plateau.

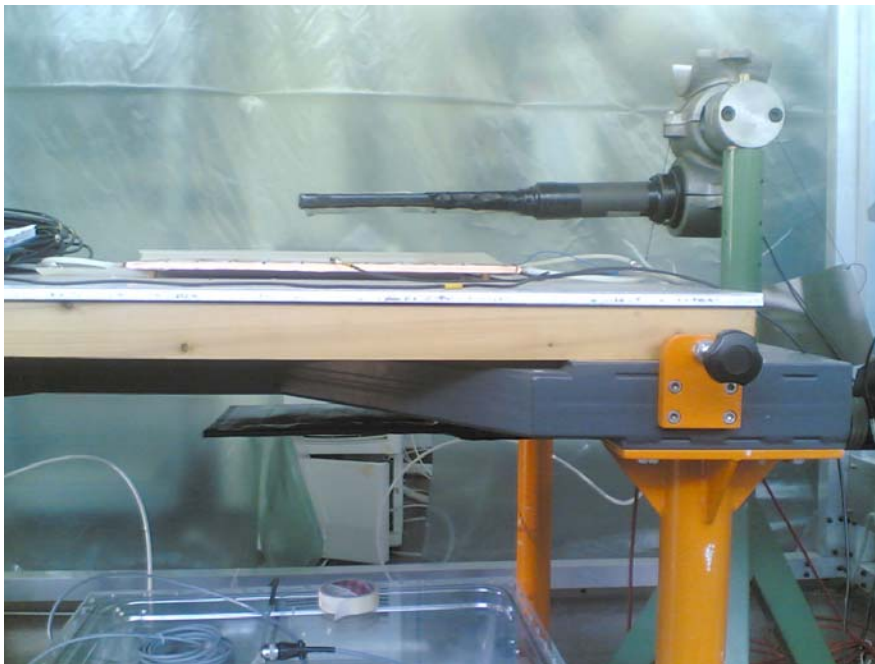


Figura 3.4 Set up preliminare del sistema di Gas Gain Monitoring. Si notano la prima gap utilizzata per gli studi preliminare e i due scintillatori di trigger

Nella figura che segue si riporta una tipica curva di efficienza per un rivelatore RPC. L'efficienza viene misurata come numero di conteggi in funzione della tensione applicata agli elettrodi resistivi. La curva mostra un lento aumento prima fino ad arrivare ad un gomito in corrispondenza del quale il numero di conteggi comincia rapidamente a salire in quanto il rivelatore, come si dice sta entrando in efficienza. Per un certo valore della tensione (nel caso degli RPC di CMS pari a circa 9000 V) si ha un ginocchio e l'efficienza si mantiene stabile per un certo intervallo. E' in tale intervallo che viene fissato il punto di lavoro del rivelatore. Per incrementi maggiori della tensione applicata il valore del campo elettrico è talmente intenso da dar luogo a scariche nel gas anche in

assenza di particelle ionizzanti. Questo aumento mostra una tendenza continua per cui alla fine si arriva alla distruzione del rivelatore.

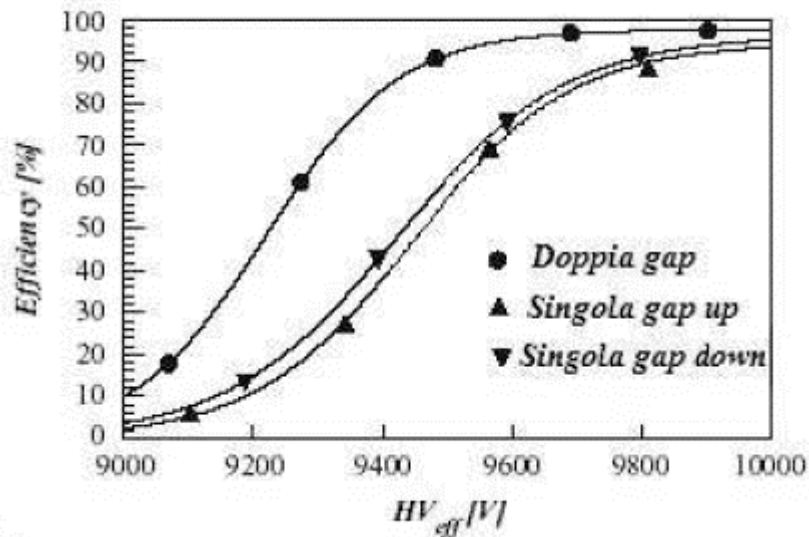


Figura 2.5 Tipico andamento delle curve di efficienza di un rivelatore ad RPC

Nella figura che segue vengono mostrati due primi plot ricavati dalla cameretta di cui si è parlato sopra. Da questi plot emerge subito una differenza e cioè la mancanza del picco di streamer nel secondo. Questo è dovuto all'aggiunta di SF_6 nella miscela come gas di "quencher" che ne evita l'innesco. In asse temporale sono riportati i tempi mentre in ordinate si ha la tensione di segnale. L'area dei picchi, prelevati sulle due pad della gap sono chiaramente uguali essendo proporzionali alla carica raccolta agli elettrodi.

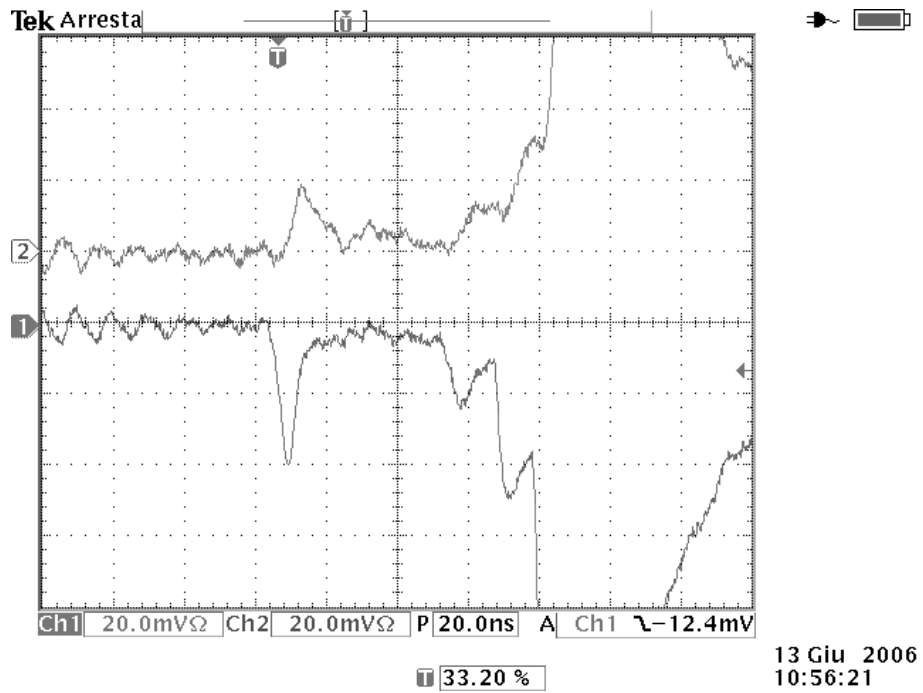


Figura 2.7 Picchi di segnale rilevati sulle due pad della gap (miscela: R134A 97% Isobutano 3%)

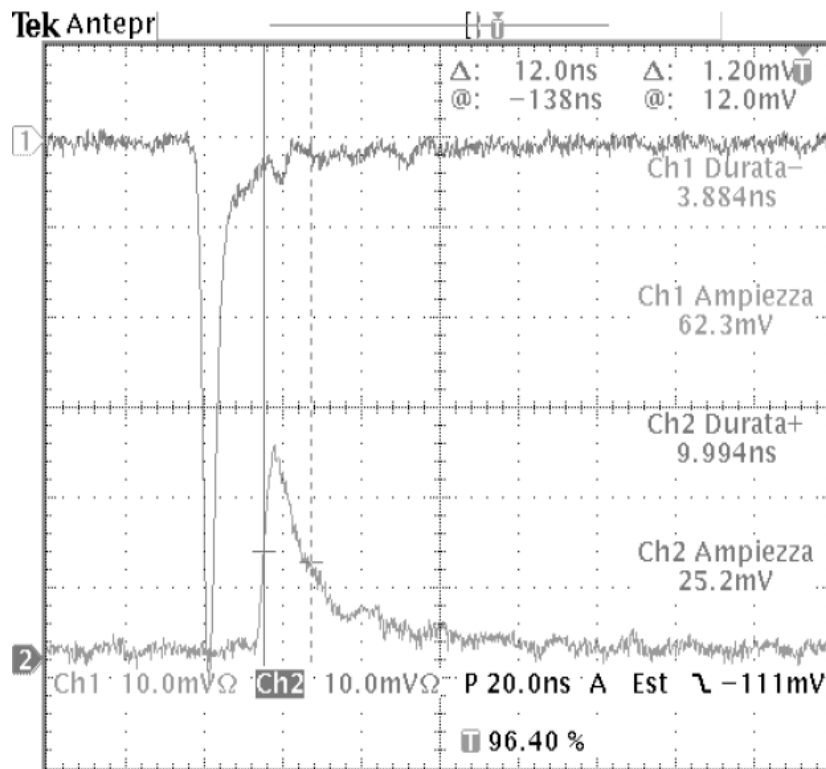


Figura 2.6 Picchi di segnale rilevati sulle due pad della gap (miscela: R134A 97,9% Isobutano 1.8% SF6 0.3%)

Capitolo 4

Test di qualità delle camere ed analisi delle correnti

4.1 Introduzione

Le camere installate nel barrel e negli endcap del rivelatore CMS vengono prima di tale operazione testate al fine di verificarne il corretto funzionamento. Tali procedure di qualifica costituiscono dei veri e propri controlli di qualità.

Tali test sono effettuati presso la ditta produttrice delle lastre di bachelite (la Ex-PlanPla), la General Tecnica di Colli (FR), che è la ditta che produce le camere, e successivamente presso i laboratori dell'INFN di Bari e Pavia e presso il Dipartimento di Fisica di Sofia.

In tali siti le camere vengono sottoposte a test sotto radiazione cosmica e quelle accettate vengono poi inviate presso l'ISR del CERN per l'ultimo test di qualifica.

4.2 Caratterizzazione meccanica

Il primo test viene effettuato direttamente in sito di produzione e riguarda l'ispezione visiva superficiale delle piastre di bachelite prima dell'accoppiamento per verificarne l'uniformità e la misura della resistività volumetrica. Il valore di quest'ultima deve essere come già detto, dell'ordine di $10^{10} \Omega \text{ cm}$. In particolare le lastre vengono suddivise in due categorie corrispondenti a diversi range del valore della resistività, nello specifico la categoria A (da 1 a $3 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$) e la categoria B (da 3 a $6 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$) ed è chiaro che nella costruzione della Singola Gap (SG) l'accoppiamento anodo-catodo avviene utilizzando lastre appartenenti alla stessa categoria.

Successivamente le lastre vengono inviate presso il sito di produzione di Colli alla General Tecnica dove vengono assemblate e prodotte le camere. Qui le lastre vengono nuovamente ispezionate per verificare eventuali danneggiamenti durante il trasporto; una volta prodotte le Singole Gaps viene effettuato su di esse un test di tenuta degli spacers flussandole e applicando una leggera sovrappressione. Si controlla inoltre che non vi siano perdite di gas dalle cornici laterali di chiusura.

Le SG vengono successivamente sottoposte alla procedura di oliatura con olio di lino per migliorare le caratteristiche di finitura superficiale. A tal fine le gaps vengono inclinate e flussate con olio di lino inserito direttamente dagli ugelli di ingresso del gas e che viene fatto uscire dagli ugelli di uscita. Tale procedura richiede qualche ora dopo di che le gaps vengono definitivamente svuotate dell'olio di lino superfluo e si attende la completa polimerizzazione di quello depositato sulla superficie.

Questa ultima fase della costruzione non può chiaramente essere controllata in quanto non è più possibile a tale stadio della lavorazione procedere all'ispezione dell'interno delle gaps. La caratterizzazione meccanica si considera quindi terminata e si rimanda alla valutazione delle caratteristiche elettriche delle gaps per una verifica dell'effettiva loro efficienza e bontà costruttiva.

4.3 Caratterizzazione elettrica

Le gaps che hanno superato le prove di caratterizzazione meccanica vengono successivamente sottoposte a quello che prende il nome di ciclo di condizionamento, per la valutazione delle loro caratteristiche elettriche. Tale procedura di qualifica è suddivisa in due fasi. Le gaps vengono connesse all'alimentatore dell'HV e flussate con una miscela composta al 96% di $C_2H_2F_4$ e al 4% di Iso- C_4H_{10} . Nella prima fase, che dura alcune ore, le gaps vengono sottoposte a tensioni crescenti dell'alta tensione fino al valore massimo di 9.6 kV con step di 1 kV. La successiva fase invece, della durata di circa un'ora è fondamentalmente analoga ma più rapida e permette di determinare la caratteristica tensione-corrente (V-I) delle SG.

I valori di corrente misurati durante tali fasi hanno naturalmente dei valori limite oltrepassandoli i quali le gaps non possono essere accettate. Nello specifico tali valori devono sottostare ai seguenti standard:

- Corrente di buio inferiore a 5 μA e assenza di picchi o tendenza a salire durante il test di lunga durata.
- Pendenza regolare della ohmica della caratteristica V-I

Il mancato soddisfacimento di anche una solo dei precedenti standard comporta il rigetto della SG. Superati questi test le SG vengono avviate all'assemblaggio. Due SG vengono accoppiate inserendo tra le due le strps.

A seguito di tale fase le DG vengono sottoposte nuovamente ad un test rapido di caratterizzazione e definitivamente accettate per l'assemblaggio in camera. Successivamente a partire dalle DG accettate si procede alla costruzione delle camere. In particolare in GT vengono prodotte le camere denominate RB2 ed RB4. Nella sede della HiTec di Napoli vengono invece prodotte le RB1, mentre a Sofia vengono costruite le RB3.

A questo punto le camere, equipaggiate con l'elettronica, le connessioni e i collegamenti per il gas vengono sottoposte anch'esse a tests come quelli precedentemente descritti. Se la camera presenta dei malfunzionamenti si cerca innanzitutto la DG che causa il problema ed eventualmente si valuta la possibilità o meno di procedere alla sua riparazione.

I dati in possesso dicono che ad oggi su circa 400 camere assemblate la percentuale degli scarti è del 13% circa di cui il 7% per andamenti anomali della corrente misurata.

4.4 Test di qualità con radiazione cosmica

Le camere prodotte vengono poi inviate presso le aree sperimentali di qualifica presso di dipartimenti di fisica di Bari, Pavia e Sofia. In particolare le RB4 e RB2 a Bari, le RB1 a Pavia e le RB3 a Sofia.

In queste sedi le camere vengono preparate per i test di qualifica con radiazione cosmica. Vengono quindi connesse ai moduli dell'alta tensione e ai sistemi di alimentazione del gas. Tali aree sono poi

equipaggiate con sistemi di acquisizione per registrare e monitorare i valori delle correnti e delle grandezze fisiche ambientali (pressione e temperatura, quest'ultima in particolare viene tenuta costante per mezzo di un sistema di condizionamento).

Le camere vengono disposte orizzontalmente ed alloggiare in torri metalliche a costituire una "pila" di RPC per poter leggere poi i segnali in coincidenza. In particolare si sottolinea la capacità della torre di Bari, in grado di alloggiare fino a 10 RPC contemporaneamente.

Il sistema di trigger è costituito da scintillatori posti alle estremità superiori e inferiori delle torri. Gli scintillatori coprono un'area totale di $125 \times 44 \text{ cm}^2$, con la dimensione maggiore perpendicolare alle strips. Gli scintillatori sono connessi in logica AND come in figura.

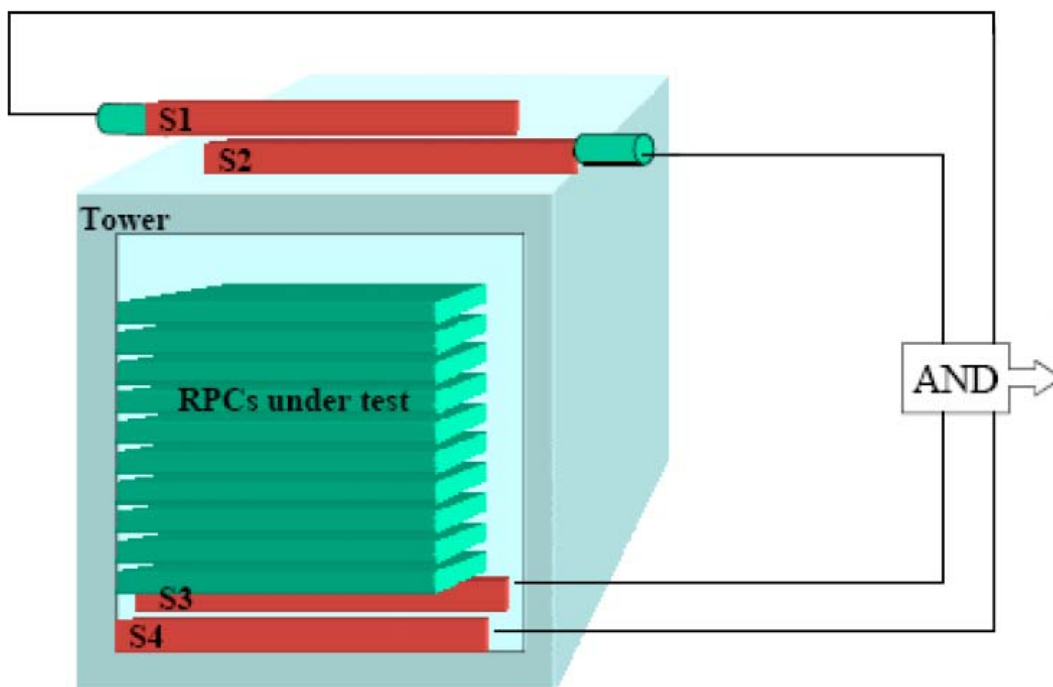


Figura 4.1 Torre di test per RPC

Gli scintillatori possono essere spostati lungo la direzione delle strip per testare varie zone delle camere (forward, backward, ed eventualmente middle per le camere che le prevedono).

La miscela di gas utilizzata per testare le camere è questa volta quella prevista per l'esperimento, quindi 96.2% di $C_2H_2F_4$, 3.5% di Iso- C_4H_{10} e 0.3% di SF_6 .

La miscela è inoltre arricchita con vapore acqueo come nella configurazione finale per conferire alla stessa un tasso di umidità compreso tra il 45 e il 50%. L'umidità serve per mantenere inalterate le caratteristiche elettriche del gas (la resistività in particolar modo). Se il flusso fosse secco la bachelite tenderebbe ad "asciugarsi" riducendo la sua resistività e quindi alterando l'efficienza della camera. Ogni camera è alimentata da due canali di alta tensione connessi ad alimentare la sezione UP della camera e la sezione DOWN. In questo modo ciascun canale alimenta sia la parte FORWARD che la parte BACKWARD.

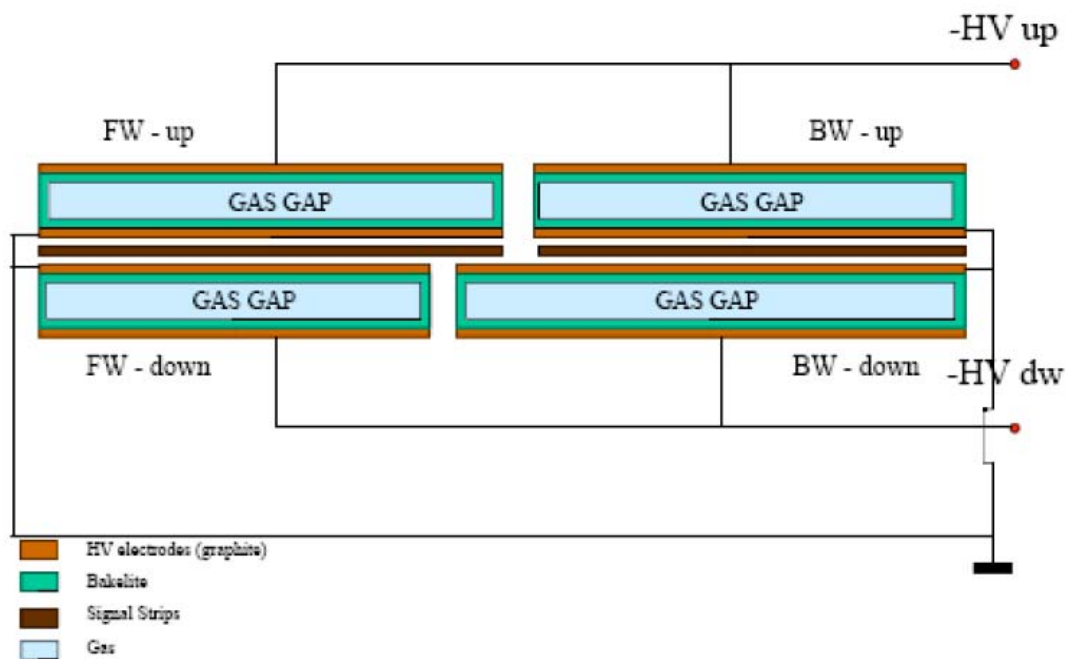


Figura 4.2 Schema di collegamento dell'HV alle singole gaps

Un sistema di alimentazione LV alimenta invece tutta l'elettronica di acquisizione.

4.5 Test di qualità presso la ISR

Il set-up di test sopra descritto è lo stesso utilizzato presso l'ISR del CERN di Ginevra. E' qui che le camere vengono inviate per l'ultimo e definitivo test di qualifica prima dell'installazione. Il sistema di acquisizione dati (Data Acquisition DAQ) consiste di due *crate* VME composti da 30 moduli TDC a 64 canali.

In questo sito le camere vengono di nuovo ispezionate per vedere se sono state danneggiate durante il trasporto. A tal proposito viene riefettuato un test di tenuta del gas per evidenziare eventuali perdite.



Figura 4.3 Veduta dell' area dell'ISR in cui vengono effettuati i test delle camere. In primo piano si vede una camera dell'endcap

Prima di accendere le camere attivando l'HV le stesse vengono flussate per tre giorni circa con un flusso di 10 l/h, equivalente a circa mezzo volume l'ora.

A questo punto le camere vengono accese e portate lentamente alla tensione di lavoro. Si inizia con l'applicazione di 1 kV e si arriva a 7kV con steps di 1 kV/hr. Giunti a 7 Kv la corrente viene aumentata di 200 V ogni due ore fino a 9.6 kV.

Al termine di questo test ne viene effettuato un altro molto più rapido. Quest'ultimo è un test di ramp-up in cui la tensione viene aumentata di 1 kV ogni 2 minuti fino al valore massimo di 9.6 kV.

I valori generati permettono di costruire le caratteristiche V-I delle camere.

La soglia di corrente al di sopra della quale si procede a scartare la camera è di 10 μ A alla tensione di 9.4 kV.

Inoltre vengono eseguiti anche test di lungo periodo (15 giorni) di stabilità della corrente. Tali test vengono effettuati lasciando le camere sotto tensione di 9.2 kV per il periodo indicato.

4.6 Il Closed Loop (CL) all'ISR

Altro aspetto importante dei test effettuati alla ISR è che le camere sono per la prima volta collegate in "Closed Loop Mode". Il sistema di alimentazione del gas permette la sua ricircolazione ed è concettualmente simile a quello previsto per il sistema finale. Esso è costituito da tre filtri purificatori alloggiati in altrettante cartridges.

I filtri utilizzati sono i seguenti

- Setaccio molecolare 5 \AA (Zeolitic Molecular Sieve)
- Filtri metallico Ni-Al₂O₃ (Leuna Catalysts)
- Miscela di filtri metallici BASF R3-11G e R3-12 contenenti CuO e ZnO (50%-50%)

Nell'elenco precedente l'ordine di presentazione dei filtri corrisponde a quello che vede il gas in ingresso nel sistema di purificazione.

4.6.1 Molecular Sieves

I setacci molecolari, denominati generalmente *Molecular Sieves*, sono degli alluminosilicati cristallini. L'acqua naturale di idratazione viene rimossa dal reticolo scaldandolo e producendo delle cavità di dimensioni tali da assorbire selettivamente molecole di grandezza specifica. Per applicazioni con flussi gassosi, come nel caso di CMS, le forme più indicate sono quelle indicate come 3 Å, 4 Å 5 Å e 13 X.



Figura 4.4 Filtro molecular sieve 5 angstrom

Questa tipologia di filtri è costituita da zeoliti sintetiche la cui struttura base è data da un cristallo costituito da tetraedri formati da atomi di alluminio o di silicio legati a quattro atomi di ossigeno. Questa macromolecola è estremamente stabile ed è caratterizzata dal possedere degli spazi di diametro uniforme la cui dimensione dipende dai tipi di atomi presenti e dal numero di elementi base legati tra loro.

La dimensione dei pori è legata al tipo di elemento è poi collegata al tipo di elemento con il quale tali zeoliti sono condizionate. In particolare il molecular sieve 5 Å è condizionato con sodio, mentre il 4 Å con potassio.

Gli spazi formano un reticolo di pori e di canali interni occupati da ioni alcalini e da molecole d'acqua facilmente removibili perché legati da deboli forze elettrostatiche. In genere ogni poro è formato dall'insieme di 6, 8, 10 o 12 tetraedri, che formano diametri variabili tra 3 e 8 angstrom. Ciò permette di operare con una certa selettività scegliendo la zeolite sintetica con pori delle dimensioni più adatte all'adsorbimento di un determinato composto chimico. Tali filtri si basano quindi su principi chimico-fisici e bloccano quindi inquinanti sia per effetto meccanico (un vero e proprio setaccio) sia per effetto chimico.

In conclusione le caratteristiche salienti delle zeoliti sintetiche sono la capacità di abbattere i contaminanti anche in presenza di umidità, sono chimicamente inerti, sono ignifughe e sono resistenti alla maggior parte degli acidi (in particolar modo HCl e HF).

Nella tabella sottostante vengono riportate le caratteristiche dei setacci molecolari sopra menzionati.

4.6.2 I filtri metallici

I filtri metallici sono due, entrambi sono filtri a base Nichel ma il primo contiene allumina (Al_2O_3) il secondo invece, composto da una miscela di due filtri commercialmente denotati come R3-11G e R12 al 50%, contiene ossidi di rame e zinco (CuO , ZnO). Il principio di funzionamento di questi ultimi in particolare è di bloccare l'ossigeno per ossidazione del rame e dello zinco in essi contenuti. Poiché tali filtri è appunto basato sull'ossidazione prima dell'inserimento nel Closed Loop essi vanno attivati attraverso una rigenerazione iniziale che li depuri dell'aria ambientale assorbita durante lo stoccaggio in magazzino e durante la procedura di inserimento nella cartuccia.



Figura 4.5 Filtro metallico CuO ZnO (a sinistra) e filtro metallico Ni-Al₂O₃ (a destra), è evidente la presenza di grafite in tale tipologia di filtri soprattutto in quello a base allumina come si può vedere dalle polveri rilasciate

4.6.3 Rigenerazione dei filtri

I filtri come visto si presentano in forma di palline o “tablets” e come tali vanno inseriti all’interno di apposite cartucce di acciaio. Tuttavia non è possibile installare immediatamente le cartucce nella rack del sistema del gas in quanto i filtri durante il loro stoccaggio e nella fase di inserimento nelle cartridges vengono a contatto con l’aria e l’umidità atmosferica in essa contenuta e quindi in un certo senso si attivano da subito cominciando ad esaurire il loro potere bloccante. Per essere sicuri della loro massima efficienza al momento dell’inserimento nel Closed Loop, i filtri subiscono una prima rigenerazione.

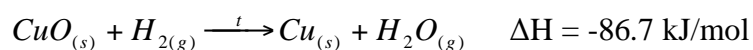
Il molecular sieve subisce un trattamento termico volto a far evaporare l’acqua in esso contenuta ed ottenendo così la sua desaturazione.

I due filtri metallici vengono invece flussati con idrogeno fornito in una miscela denominata Noxal3^{††}, invece di idrogeno puro. Il trattamento cui sono sottoposti può essere riassunto nei seguenti steps:

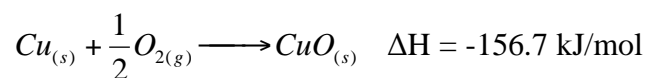
^{††} Miscela di Argon e H₂ (20%)

- Flussaggio con Noxal per almeno due ore con aumento graduale della temperatura fino a 150°C.
- Aumento successivo fino a 215°C.
- Interruzione del flusso di Noxan e successivo raffreddamento delle cartucce fino a temperatura ambiente. Durante il raffreddamento si fa fluire un gas inerte, per esempio argon.

Nel caso specifico dei filtri ad ossido di rame ed ossido di zinco per la loro attivazione è necessario procedere ad una loro riduzione da ossidi a metalli puri. Nel caso del rame si ha ad esempio:



Durante la purificazione del gas si ha la seguente reazione di ossidazione:



4.7 Analisi delle correnti

I valori delle correnti acquisiti durante i test con i cosmici vengono registrati su un database consultabile sul web.

I files generati sono di due tipi e vengono suddivisi in:

- imonitor_ISR_xx_xx_xx.dat
- xiscan_ISR_xx_xx_xx.dat

i campi contrassegnati dalle x sono relativi a giorno mese e anno.

La prima tipologia di file è relativa alla acquisizione dei dati dei test “lenti” e contiene i valori di corrente e tensione per ciascuno dei 48 canali con una frequenza di campionamento di circa 1 misura ogni 10 minuti.

La seconda tipologia invece riporta i valori di tensione e corrente per i “ramp-up” rapidi effettuati alla fine dei test brevi.

Per l’analisi delle correnti si è fatto uso principalmente di dati presi dai files *imonitor*.

L’elaborazione di questi files è stata effettuata tramite un programma compilato in MATHEMATICA®. Un tipico file imonitor è quello riportato in figura:

```
imonitor_ISR_01_04_2006 - WordPad
File Modifica Visualizza Inserisci Formato ?
+++++
Sat Apr 1 00:07:07 CEST 2006
IDX 9187
Connecting on RPC_Caen_ISR tcpip = 137.138.132.125

CAENHVInitSystem: OK (num. 0)

Channel 01 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 02 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 03 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 04 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 05 has Vmon =     9197.00 and Imon =    0.10000
Channel 06 has Vmon =     9202.00 and Imon =    0.20000
Channel 07 has Vmon =      2.00 and Imon =    0.00000
Channel 08 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 09 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 10 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 11 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 12 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 13 has Vmon =     9194.00 and Imon =    3.10000
Channel 14 has Vmon =     9208.00 and Imon =    0.50000
Channel 15 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 16 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 17 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 18 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 19 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 20 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 21 has Vmon =     9202.00 and Imon =    0.20000
Channel 22 has Vmon =     9207.00 and Imon =    0.20000
Channel 23 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 24 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 25 has Vmon =     9202.00 and Imon =    1.70000
Channel 26 has Vmon =     9199.00 and Imon =    0.70000
Channel 27 has Vmon =     9200.00 and Imon =    0.70000
Channel 28 has Vmon =     9197.00 and Imon =    1.00000
Channel 29 has Vmon =     9197.00 and Imon =    1.20000
Channel 30 has Vmon =     9203.00 and Imon =    0.90000
Channel 31 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 32 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 33 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 34 has Vmon =      2.00 and Imon =    0.00000
Channel 35 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 36 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 37 has Vmon =     9199.00 and Imon =    0.10000
Channel 38 has Vmon =     9201.00 and Imon =    0.10000
Channel 39 has Vmon =     9199.00 and Imon =    0.20000
Channel 40 has Vmon =     9200.00 and Imon =    0.30000
Channel 41 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 42 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 43 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 44 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 45 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 46 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
Channel 47 has Vmon =      1.00 and Imon =    0.00000
Channel 48 has Vmon =      0.00 and Imon =    0.00000
+++++
Per ottenere la Guida, premere F1
```

Figura 4.6 Tipico file di dati imonitor_ISR_xx_xx_xxxx; sono evidenti le indicazioni sull’ora di misura e i valori di tensione e corrente per ciascuno dei 48 canali relativi alle 24 camere sotto test

Tra tutti i canali sono stati considerati solo quelli attivi con tensione superiore o uguale a 9200 V ed i valori di corrente ad essi relativi e misurati ogni dieci minuti sono stati mediati per ricavarne un indicativo per l'intera giornata. I successivi plot della corrente in funzione del tempo ricavati permettono di monitorare eventuali aumenti delle correnti che potrebbero essere indice di una variazione della composizione della miscela gassosa e quindi delle sue caratteristiche dielettriche. Questo costituisce quindi un' immediata rivelazione della presenza di un inquinante.

L'analisi dei dati finora acquisiti ha permesso di evidenziare andamenti anomali delle correnti in alcune camere dopo un periodo di connessione al sistema Closed Loop di circa una ventina di giorni. Per non stressare oltremodo le camere facendole lavorare per lunghi periodi con correnti elevate in tali situazioni il circuito viene collegato all'Open Loop. Non appena ciò viene fatto quello che si nota è che la corrente nelle camere mostra subito una tendenza alla discesa.

I filtri vengono poi fatti rigenerare e dopo averli risistemati nel loro alloggiamento nella rack del sistema di purificazione, il sistema di alimentazione del gas viene di nuovo connesso in Closed Loop.

Quello che si evidenzia nei plot ricavati è che anche in questa situazione i valori di corrente continuano la loro discesa. Ciò sembra indicare quindi che l'innalzamento delle correnti sia fortemente legato alla saturazione dei filtri e quindi alla loro non più effettiva capacità di filtrare un determinato inquinante.

Come già detto, il periodo di funzionamento dei filtri è indicativamente di 20-25 giorni di utilizzo continuativo. Tale limite è sostanzialmente dato dalla saturazione del molecular sieve. Abbiamo visto infatti che la forte igroscopicità di questo filtro fa sì che esso si saturi d'acqua. La perdita di tale sua caratteristica viene evidenziata dal fatto che il tasso di umidità misurato in uscita dal sistema di purificazione mostra un graduale aumento. Questo comporta poi una minore necessità di aggiungere acqua alla miscela per portare il tasso di umidità fino al 45-50% nominale richiesto. Si arriva poi ad un punto in cui tale aggiunta deve cessare per non superare tale valore. Si ha quindi l'evidenza che il filtro non è più in grado di bloccare l'umidità e sia cioè saturo.

Il periodo di saturazione per i due filtri metallici è invece generalmente più lungo di una decina di giorni. Ciò si è visto poiché durante la fase di studio del periodo ottimale di rigenerazione si è provato a rigenerare il solo setaccio molecolare lasciando i due filtri metallici nel sistema di purificazione. A seguito della successiva installazione del molecular sieve rigenerato e della riconnessione al CL le correnti hanno mostrato una tendenza all'innalzamento dopo appunto dieci giorni circa rivelando quindi la saturazione dei filtri metallici.

Nella figura che segue si mostra uno dei plot ricavati dall'analisi delle correnti; il suo andamento è indicativo di quello di altre camere monitorate da Febbraio a Luglio del 2006. I dati sono stati fittati con un sigmoide, per la salita, e con una esponenziale negativa, per la discesa.

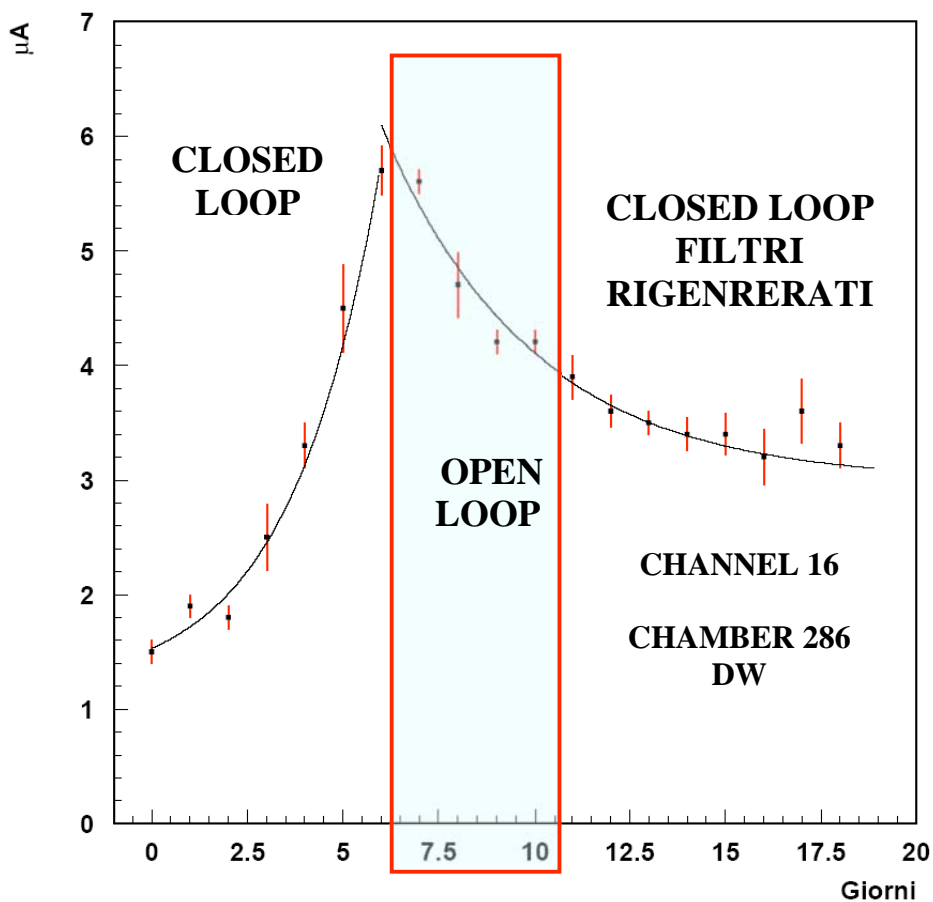


Figura 4.7 Andamento delle correnti in funzione del tempo per una camera in cui è stato evidenziato un sensibile aumento delle correnti

La salita si ha, infatti, in corrispondenza della perdita di efficienza dei filtri che non è istantanea ma graduale. Dal momento in cui i filtri non sono più efficienti il rate di concentrazione rimane costante per poi tendere via via a zero man mano che si arriva alla saturazione. Una curva sigmoideale descrive bene questa fenomenologia e ciò è mostrato anche dalla bontà del fit.

Nella fase di discesa delle correnti, invece, i filtri lavorano in piena efficienza e quindi si ha un semplice fenomeno di svuotamento del volume ben descritto da una esponenziale negativa. Le differenti pendenze delle curve, sono spiegate dalla diversità dei fenomeni legati alla fase di salita e discesa delle correnti ora descritti.

L'assunzione fatta, e comunque da verificare, è che le correnti aumentino in maniera proporzionale alla concentrazione di inquinante.

Date	CH 16
	Current (A)*10 ⁻⁶
30-mag	1,5
31-mag	1,9
01-giu	1,8
02-giu	2,5
03-giu	3,3
04-giu	4,5
05-giu	5,7
06-giu	5,6
07-giu	4,7
08-giu	4,2
09-giu	4,2
10-giu	3,9
11-giu	3,6
12-giu	3,5
13-giu	!NO DATA!
14-giu	3,4
15-giu	3,4
16-giu	3,2
17-giu	!NO DATA!
18-giu	!NO DATA!
19-giu	3,6
20-giu	3,3
21-giu	!NO DATA!
22-giu	!NO DATA!
23-giu	3

Tabella 4.1 Andamento delle correnti in funzione del tempo.

I periodi di salita e discesa sono dell'ordine della decina di giorni e si evidenzia in particolare come la discesa inizi immediatamente in corrispondenza della connessione all'open loop e prosegue con i filtri rigenerati.

I valori delle correnti e il periodo di misura sono indicati nella tabella sottostante.

In corrispondenza di alcuni giorni, come è evidente non si hanno informazioni in quanto il test non è stato effettuato. Dove possibile però il valore utilizzato per fittare la curva è stato ricavato dal file *xiscan* del giorno per il quale manca l'informazione e relativo alla tensione 9.2 kV del rump-up.

Il problema dell'innalzamento delle correnti sebbene risolto dalla rigenerazione periodica dei filtri rappresenta comunque sempre l'evidenza sperimentale della presenza di un inquinante non più bloccato da essi e di natura al momento ignota. La sua identificazione è di prioritaria importanza ai fini di una migliore ottimizzazione dei periodi di rigenerazione, tenendo comunque in considerazione il fatto che nel sistema finale per CMS il gas in circolo corrispondente ad un ricambio l'ora è di circa 18 m³. A questo bisogna aggiungere che la radiazione che ci sarà all'LHC non è neppure lontanamente paragonabile a quella cosmica e può ragionevolmente portare ad ipotizzare una produzione di inquinante molto maggiore. Si stimano quindi tempi molto più brevi di funzionamento in continuo per i filtri e quindi rigenerazioni molto frequenti. Da ultimo c'è da sottolineare che l'attuale configurazione di filtri limita l'innalzamento delle correnti solo se in nella miscela gassosa in Closed Loop viene comunque inserito un 10% di miscela fresca e ne viene prelevata una identica proporzione in uscita dai rivelatori. Tale percentuale in termini economici è "fuori budget" per il gruppo di CMS e non sostenibile. Per rientrare nei costi la percentuale massima di miscela fresca inserita ad ogni ciclo è del 2%, una differenza non trascurabile sull'intero volume di gas che luserà nel detector.

Nei paragrafi che seguono verranno mostrati quelli che sono i programmi di studio e quanto finora svolto per procedere ad una indagine sistematica di ciò che avviene nel sistema di ricircolo Closed Loop.

Capitolo 5

Programma di indagine delle problematiche relative al Closed Loop

5.1 Il sistema di fornitura della miscela gassosa

I sistemi di approvvigionamento della miscela gassosa per i quattro esperimenti all'LHC sono stati disegnati con particolare attenzione alle caratteristiche di uniformità dei disegni esecutivi.

Essi saranno composti da moduli come miscelatori, filtri purificatori, unità di distribuzione, etc...in maniera tale da semplificare i layout e la manutenibilità a lungo termine.

5.1.1 Primary gas supply

I sistemi primari di fornitura del gas sono collocati nell'edificio SGX. I gas sono forniti da batterie di Dewars, o cilindri individuali con standard CERN. Essi permettono di passare automaticamente dal gruppo di servizio al gruppo di riserva quando l'unità di fornitura è vuota.

Per controllare l'effettivo status delle riserve, ogni apparato di approvvigionamento primario è fornito di flussimetri di massa. Il consumo di gas atteso è riportato in tabella 5.1.

Gas	Expected Run Flow [m ³ /h]	Expected max. Flow [m ³ /h]	Containment		Estimated operating time at Run conditions	
			Main Supply	Reserve	Main Supply	Reserve
CF ₄	0.06 - 0.10	0.7	4 cylinders 50 ltr.	4 cylinders 50 ltr.	15 - 24 days	15 - 24 days
C ₂ H ₂ F ₄	0.1 - 0.2	1 - 2	4 cylinders 50 ltr.	4 cylinders 50 ltr.	12 - 24 days	12 - 24 days
iC ₄ H ₁₀	< 0.01	< 0.1	1 cylinder 50 ltr.	1 cylinder 50 ltr.	> 50 days	> 50 days
SF ₆	< 0.005	0.01 - 0.02	1 cylinder 50 ltr.	1 cylinder 50 ltr.	> 50 days	> 50 days
Ar/H ₂	< 0.01	< 1	4 cylinders 50 ltr.	4 cylinders 50 ltr.	> 30 days	> 30 days

Tabella 5.1 Flussi nominali e consumo atteso

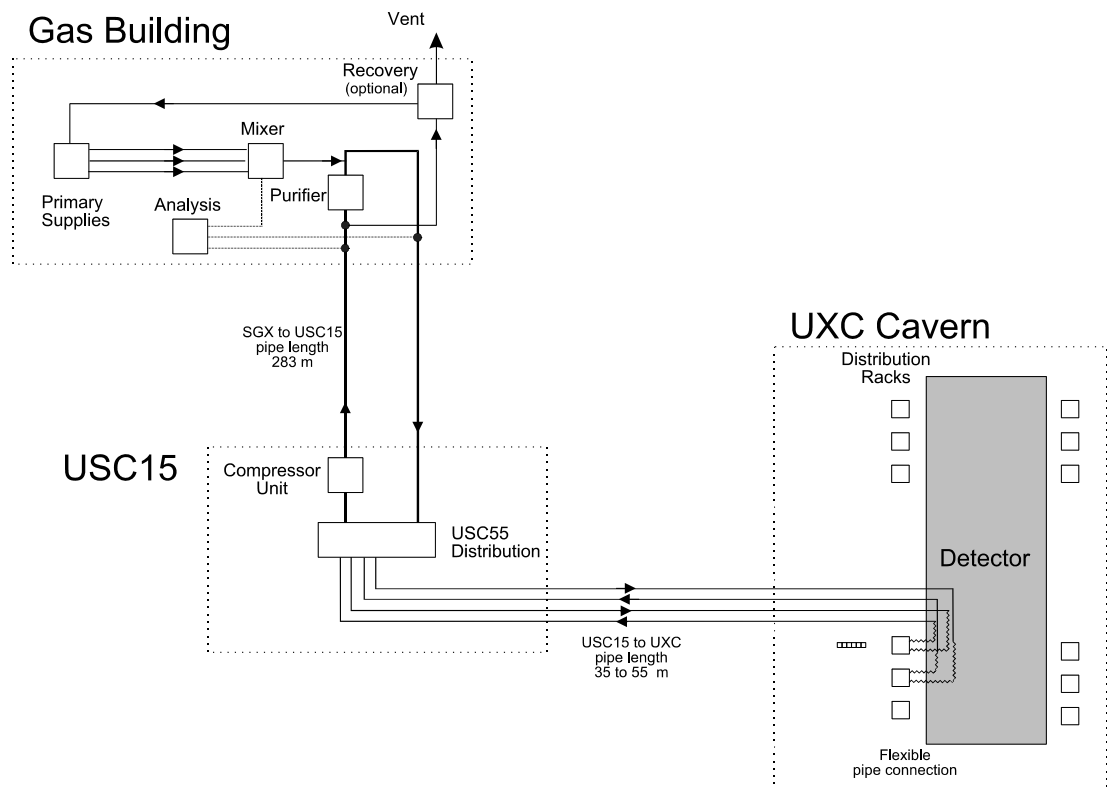


Figura 5.1 Pianta degli edifici SGX e USC per la distribuzione del gas

5.2 Circolazione a ciclo chiuso: il closed loop

Tutti e tre i sistemi di fornitura del gas per i rivelatori di muoni di CMS necessiteranno di un sistema di ricircolazione della miscela gassosa, a causa delle grandi dimensioni del detector e del costo dei gas.

Un tipico circuito a ciclo chiuso è mostrato in fig. 5.1; esso è costituito di moduli che sono alloggiati in “racks” standard e che provvedono alle seguenti funzioni:

- Fornitura della miscela gassosa (questa funzione può essere condivisa da più di un sottosistema)
- Miscelamento
- Distribuzione
- Purificazione
- Recupero (solo nel caso di forti interessi economici e ambientali)

- Analisi del gas

E' di primaria importanza, per quanto detto prima, che i singoli moduli siano conformi agli standard comuni. Questa richiesta è chiaramente molto più semplice da soddisfare per quei moduli che sono più distanti dal rivelatore, come per esempio quello di miscelamento o quello di purificazione.

System	Gas Mixture	Volume [m ³]	Vol / Time. Change	No. of Chambers	No. of Gas Channels	Impurity Limits [ppm]	
CMS	DT	Ar - CO ₂ (80 - 20)	250	20	250	250	O ₂ <500
	CSC	Ar - CO ₂ - CF ₄ (40 - 50 - 10)	65.7	10	540	162	O ₂ <100 H ₂ O<1000 N ₂ <3000
	RPC	C ₂ H ₂ F ₄ - i-C ₄ H ₁₀ (96.5 - 3.5)	18	average 4.6	420 Barrel 756 Forw.	240 Barrel 288 Forw.	O ₂ <1000 H ₂ O<1000 N ₂ <1%

Tabella 5.2 Flussi relativi ai vari rivelatori

5.3 L'installazione nel building SG5

La sala di miscelamento nell'edificio in superficie ha un'area di 10x15.4 m², è ventilata, condizionata ed equipaggiata con rivelatori di gas infiammabili in corrispondenza delle bocchette d'uscita.

A causa della presenza di gas infiammabili, la stanza è stata classificata come area a rischio "ZONE II", e quindi l'equipaggiamento al suo interno deve essere conforme agli standard europei per la protezione da esplosioni per tale categoria di area^{§§}.

La piantina in fig. 5.2 mostra la posizione delle racks con i moduli per il miscelamento.

^{§§} CERN Flammable Gas Safety Manual 1996.

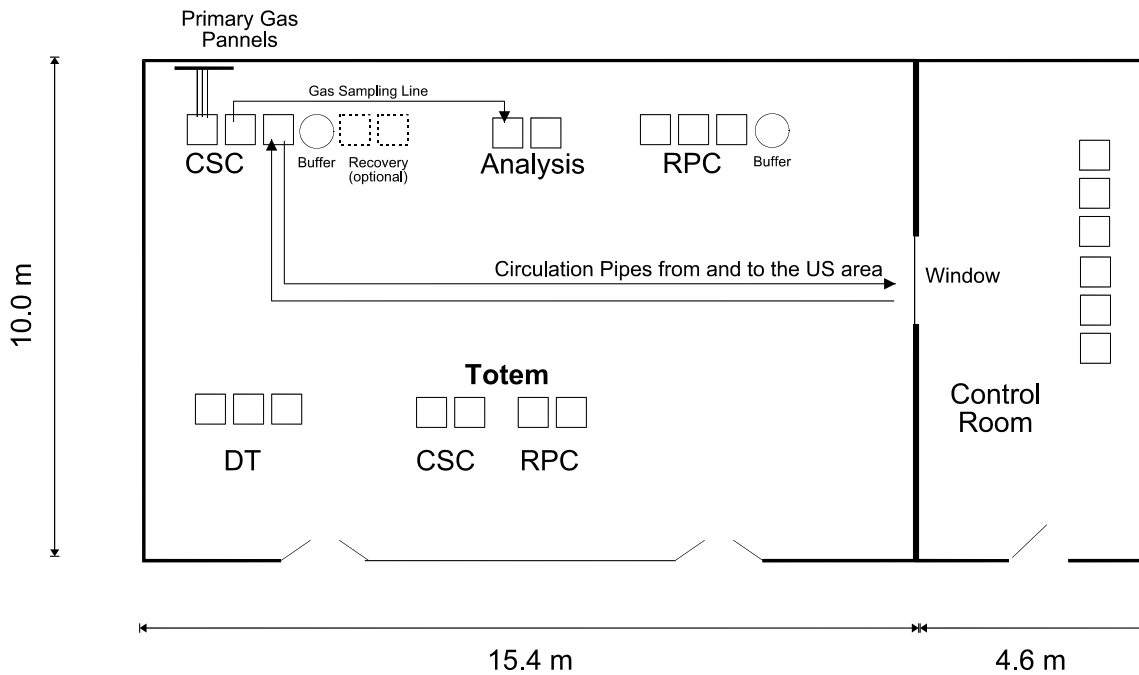


Figura 5.2 Posizione delle racks con i moduli di miscelamento

5.3.1 Moduli di miscelamento

Il miscelamento di un sistema di ricircolazione del gas come quello di CMS deve essere capace di:

- Provvedere alla corretta miscela del gas in condizioni di portata variabile o costante.
- Inserire una certa percentuale di miscela fresca nel sistema di ricircolazione.

I gas sono miscelati nelle appropriate proporzioni usando flussimetri di massa digitali (MFC^{***}) funzionanti nel cosiddetto BLENDING MODE. Tale modo di funzionamento consiste nel far fluire liberamente il gas presente in percentuale maggiore attraverso il corrispondente flussimetro. Il flusso di massa a esso misurato è trasmesso agli MFC del secondo e terzo componente della miscela. Questi ultimi regolano il flusso attraverso di essi in maniera tale da mantenere la proporzione voluta nella miscela.

*** Mass-flow-meter-controller

I flussi attesi per il sistema Closed Loop sono mostrati in tabella 5.3.

System	Total		Component 1			Component 2			Component 3		
	Fresh Gas Flow [m ³ /h]	Fill or Purge Flow [m ³ /h]	Gas	Closed Loop Run Flow [m ³ /h]	Fill or Purge Flow [m ³ /h]	Gas	Closed Loop Run Flow [m ³ /h]	Fill or Purge Flow [m ³ /h]	Gas	Closed Loop Run Flow [m ³ /h]	Fill or Purge Flow [m ³ /h]
DT	2.1	21	Ar	1.77	17.7	CO ₂	0.31	3.1			
CSC	0.33	6.7	Ar	0.13	2.7	CO ₂	0.17	3.3	CF ₄	0.03	0.67
RPC	0.12	3.0	C ₂ H ₂ F ₄	0.11	2.8	iC ₄ H ₁₀	0.005	0.12	SF ₆	0.001	0.03

Tabella 5.3 Flussi attesi per il sistema Closed Loop

A valle degli MFC una linea di fornitura permette di iniettare il gas ad una rate costante usando un rotametro.

5.4.1 Moduli di purificazione

La motivazione alla base dell'utilizzo del Closed Loop è quella di combinare una sensibile sostituzione del gas all'interno dei rivelatori con un accettabile consumo di miscela fresca.

La percentuale di miscela fresca inserita è poi direttamente collegata alla concentrazione di eventuali inquinanti, che quindi necessitano di essere filtrati. Per esempio filtri in grado di bloccare ossigeno ed umidità sono necessari per i rivelatori DT e CSC. Per gli RPC invece una certa percentuale di umidità è richiesta per mantenere “bagnata” la bachelite e lasciare quindi in efficienza il rivelatore. In esso è invece importante bloccare inquinanti come l'acido fluoridrico che si forma a seguito della ionizzazione del gas di miscela e della sua interazione con l'umidità presente. La tabella 5.4 mostra delle stime realistiche della concentrazione di ossigeno ed acqua per il gas in ingresso e quello in uscita.

System	Circulation Flow [m ³ /h]	Assumed Impurity Concentrations in the Return Gas [ppm]		Required Input Purity [ppm]		Amount of Pollutant to be Removed per Day	
		O ₂	H ₂ O	O ₂	H ₂ O	O ₂ [litre]	H ₂ O [g]
DT	20.8	50	50	40	40	5.0	3.6
CSC	6.8	50	50	30	40	3.2	1.2
RPC	3.0	1000	1000	>1000	>1000	-	-

Tabella 5.4 Quantità previste di ossigeno e acqua nel ricircolo

Absorber	Oxygen Absorption Capacity for 1 kg of Absorbent	Water Absorption Capacity for 1 kg of Absorbent	Reference
Leuna Catalyst 6525 Mixture of nickel, nickel oxide and Al ₂ O ₃ carrier	15 ltr.	not measured	i
BASF R3-11G/R3-12 Activated copper oxide deposit on porous graphite support	4 ltr.	45–97g	ii
Molecular Sieves 3A, 4 A, 5 A or 13X	---	typically 200g	

Tabella 5.5 Capacità di assorbimento di acqua e ossigeno per i filtri in uso

5.5 Il sistema del gas nella caverna UX

Nella caverna le racks per il gas sono installate come in fig. 5.3 e hanno dimensioni 60x60 cm² per ottimizzare l'occupazione dello spazio, che è un requisito critico in tale posto.

5.5.1 Caverna UX: racks di distribuzione

Gli elementi centrali delle racks sono i “manifolds” di distribuzione con i flussimetri di massa ad essi integrati. I flussimetri di massa consistono in un resistore montato in una flowcell interamente in alluminio. Una piccola corrente attraverso il resistore (20-30 mA) causa un suo riscaldamento,

allo stesso tempo il gas che fluisce all'interno della flowcell lo raffredda. Studi sistematici^{†††} hanno mostrato che l'aumento di temperatura può essere usato come un'accurata misura del flusso di massa.

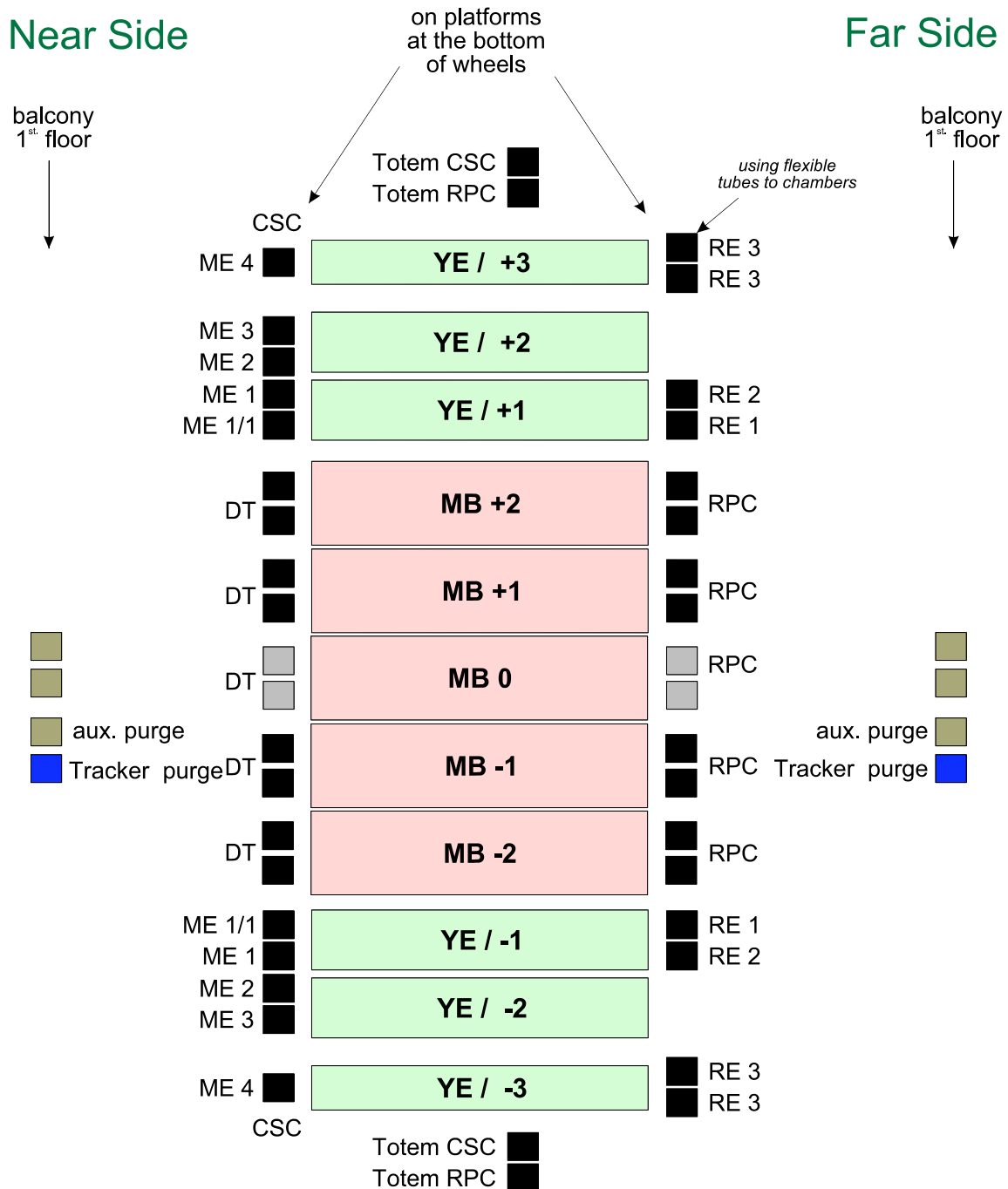


Figura 5.3 Panoramica delle rack di distribuzione nella caverna.

^{†††} M.van der Kleis. PT100 Channel Flowmeter for the LHC Experiments, *Technical Student Report Feb. 2001*.

5.6 Il problema dell'inquinamento della miscela gassosa

L'innalzamento delle correnti rilevato in sede di analisi dei dati delle camere in test all' ISR è certamente da ricondurre alla presenza di un inquinante prodotto all'interno del sistema di ricircolazione del gas ed al suo accumulo. L'immediato abbassamento dei valori misurati per le correnti in corrispondenza del passaggio dal modo di circolazione a ciclo chiuso a quello a ciclo aperto e a seguito dell'installazione di filtri rigenerati ne è la prova evidente. Rimane tuttavia ignota l'identità di tale inquinante e soprattutto il punto in cui esso si origina. Le normali indagini gas cromatografiche finora eseguite non hanno permesso di effettuarne l'identificazione.

La configurazione di filtri in uso è certamente funzionante ma, come già menzionato, è ottimizzata per un inserimento di miscela fresca nel sistema di ricircolo in percentuale pari al 10% ed un periodo di utilizzo di 20 giorni sotto radiazione cosmica. Al di sotto del 10% di miscela fresca si hanno problemi con le correnti misurate ed è chiaro che in quest'ottica il sistema di purificazione necessita un accurato studio per massimizzarne le prestazioni e raggiungere il target del 2% imposto da ragioni di risparmio economico e di sostenibilità dei costi.

E' in questo contesto che si comprende inoltre l'importanza del Gas Gain Monitoring System sopra presentato e del complementare Gas Quality System. L'individuazione dei fenomeni che avvengono nel sistema di ricircolo e la loro comprensione richiede quindi un'ulteriore sforzo di indagine.

Verranno nelle presenti pagine presentate quelle che sono state le analisi e gli studi svolti finora; si è partiti dall'analizzare il rivelatore attraverso l'ispezione visiva di una gap sottoposta ad irraggiamento presso la GIF del CERN. Sulla stessa sono poi stati effettuati dei campionamenti e successive analisi SEM/EDS con l'uso quindi della microspettrografia elettronica. Alcuni campioni che vedremo nel dettaglio sono poi stati analizzati utilizzando la diffrattometria a raggi X.

In maniera complementare è stata poi eseguita una simulazione numerica del flusso interno alla gap con l'utilizzo del codice di calcolo commerciale Fluent®. Questo per verificare le capacità di lavaggio del volume interno della camera ad opera del flusso gassoso.

Il programma di ispezione termina poi con le analisi chimiche in corso sui filtri in varie condizioni di efficienza e di sezioni dei tubi di alimentazione in rame.

5.7 Gap 50 x 50 cm² sottoposta ad irraggiamento alla GIF^{†††}

Le prime analisi sono state effettuate su una gap sottoposta a condizioni di forte irraggiamento presso la GIF per studiare l'aging delle camere. La gap è stata flussata con una miscela composta da: 96 % C₂H₂F₄ 3.5% iso-C₄H₁₀ 0.5% SF₆ ed irraggiata con una sorgente di ¹³⁷Cs ad una intensità di 650GBq^{§§§}.

In fig. 5.1 è possibile vedere la gap come essa appariva prima dell'apertura. Per effettuare la procedura di apertura si è provveduto a chiudere tutti gli ugelli di ingresso/uscita del gas tranne uno. Attraverso quest'ultimo è stata soffiata gradualmente aria fino a provocare il distacco dei distanziatori ed in definitiva l'apertura della cameretta.

Una volta separati l'anodo e il catodo della camera si è potuto procedere ad una prima verifica visiva dello stato del rivelatore al suo interno.

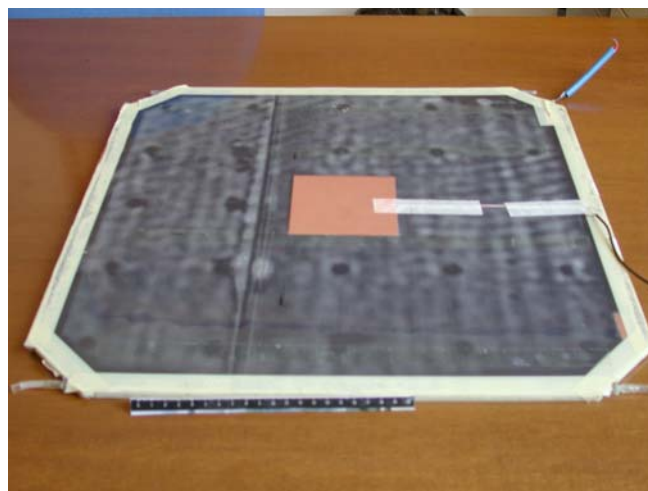


Figura 5.1 Immagine della gap 50x50 cm² sottoposta a test di irraggiamento presso la GIF, si notano la pad in rame 10x10 cm² utilizzata per prelevare i segnali e la connessione dell HV (filo blu)

^{†††} Gamma Irradiation Facility

^{§§§} L'unità di misura della radioattività è il baquerel (Bq); 1 Bq corrisponde a una disintegrazione al secondo.

5.7.1 Ispezione visiva

Dopo la separazione, come detto, le due piastre componenti sono state ispezionate per evidenziare la presenza di difetti o alterazioni al loro interno.

Nel caso della camera a nostra disposizione si è constatata la presenza di alterazioni superficiali puntiformi della parte interna. La disposizione pressoché randomica presenta una certa concentrazione in corrispondenza di uno degli ugelli di immissione del gas ed è perfettamente simmetrica, troviamo cioè copia degli stessi difetti nella stessa posizione su entrambe le lastre di bachelite. Ciò fa pensare a degli effetti di scarica tra le due. Morfologicamente tali difetti sono simili a delle punte di colore bianco ed una analisi più accurata ne a fatto supporre la natura cristallina. Per tale motivo si è proceduto ad una mappatura delle lastre con l'individuazione delle aree di maggior interesse da sottoporre alle successive analisi per mezzo di microscopia elettronica e diffrattometria ai raggi X.



Figura 5.2 Vista interna delle lastre di bachelite (anodo a sinistra e catodo a destra), si noti la simmetria dei difetti superficiali sulle due sinonimo di un ponte elettrico tra le facce del rivelatore

La scelta dei campioni da analizzare è stata effettuata tenendo in considerazioni anche le future necessità di eseguire altri studi. Dopo prove di taglio effettuate su pezzi di bachelite si è infatti

notato che si aveva produzione di polveri e trucioli che tendevano ad aderire allo strato di olio di lino superficiale e quindi a sporcare il campione. Tra tutte le procedure di taglio quella ottimale è risultata essere quella ottenuta con una punta a tazza calettata su di un trapano a colonna posto in lenta rotazione. Ciò permette di ottenere campioni circolari del diametro di circa 2 cm particolarmente idonei ad essere inserite all'interno del SEM.

Tuttavia anche questo modo di procedere non è esente dal produrre trucioli e polvere in una certa quantità. Le aree di interesse sono perciò state protette tramite copertura con dei dischetti adesivi ricavati da nastro biscotch opportunamente fustellato in maniera da ottenere una corona circolare adesiva che non andasse a depositare residui di collante in corrispondenza della zona da analizzare.

I campioni sono così stati tutti preventivamente coperti e poi successivamente prelevati con la procedura pocanzi descritta. Ecco perché si sono dovute considerare anche le future necessità; si hanno infatti ora a disposizione ulteriori campioni da poter analizzare.

In fig 5.3 sono visibili le aree prelevate; i campioni sono stati suddivisi in:

- Campioni CC (Centro-cella): sono aree poste al centro tra quattro spacers e sono tutti non difettati
- Campioni D (Difettati): sono aree in cui sono presenti le caratteristiche punte viste all'ispezione visiva
- Campioni M (Manine): sono le aree prossime agli spacers in cui si ha una colatura di olio di lino

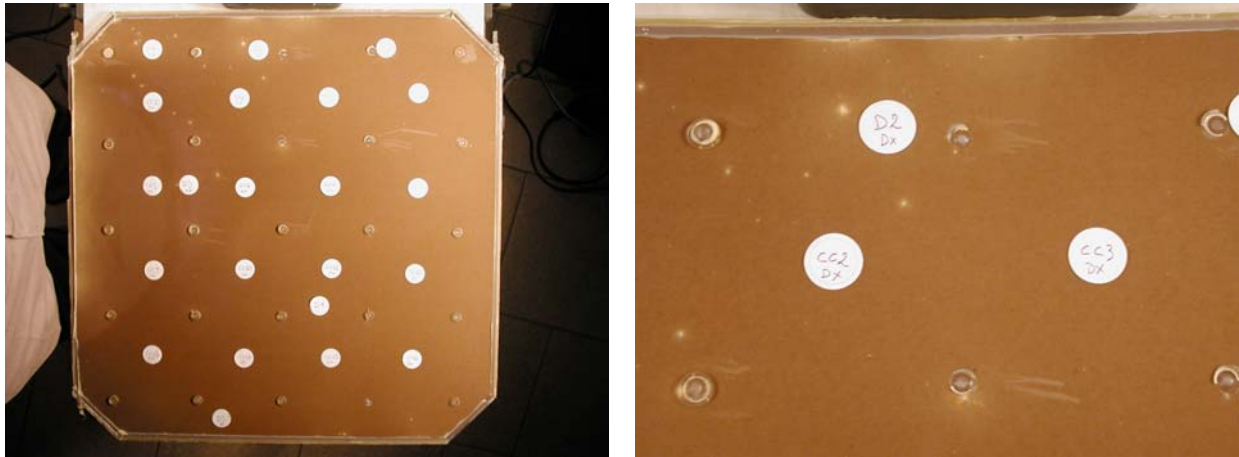


Figura 5.3 Campionamento e copertura delle aree interessate al prelievo per le analisi successive. A destra è presentato un particolare in cui sono visibili due campioni centrocella e un campione difettato

Una volta prelevati i campioni sono stati incollati con della grafite alle basette di inserimento all'interno del SEM ed è stato creato un ponte di grafite per favorire la conduzione delle cariche elettroniche depositate sulla bachelite dal fascio del microscopio.

5.7.2 L'analisi SEM/EDS

Una volta pronti i campioni sono stati sottoposti a microscopia elettronica e spettroscopia EDS. Prima di procedere con la visualizzazione dei risultati ottenuti dalle analisi si dà una panoramica circa i principi di funzionamento e le possibilità di indagine disponibili con l'utilizzo di tale tecnologia. Le analisi SEM/EDS sono state effettuate utilizzando il microscopio elettronico del Dipartimento di Metallurgia della Facoltà di Ingegneria.

5.7.2.1 Principi generali della spettroscopia EDS

Con il termine spettroscopia EDS (Energy Dispersive X-ray analysis) si indica una metodica analitica strumentale che sfrutta l'emissione di raggi X generati da un fascio elettronico accelerato incidente sul campione.

La strumentazione è comunemente costituita da un microscopio elettronico a scansione tipo SEM-EDS. Schematicamente si può descrivere il principio di funzionamento nel seguente modo: un emettitore costituito da un filamento di tungsteno, o di esaboruro di lantanio, più costoso ma con migliore rendimento energetico con guadagno in termini di sensibilità, che viene portato oltre i 1000°C per riscaldamento elettrico, funge da sorgente di elettroni per effetto termoionico. Il fascio elettronico così generato viene dapprima accelerato da una differenza di potenziale di 0,3-30 KV e quindi passa prima attraverso un collimatore elettromagnetico per essere deflesso, in modo da generare la scansione, e finalmente collimato verso il piatto contenente il campione in esame.

Il rivelatore, che è disposto in modo tale da ricevere il massimo livello di radiazione assorbibile, può essere del tipo a *dispersione di lunghezza d'onda (WDS)* o a *dispersione di energia (EDS)*, ognuno con rispettivi pro e contro:

- Rivelatore WDS: sfrutta le caratteristiche ondulatorie dei fotoni X. È costituito da un cristallo ricurvo, il "cerchio di Rowland", con un determinato passo del reticolo cristallino, sul quale sono disposti il campione e il contatore di fotoni. Seguendo la legge di Bragg, solamente una determinata lunghezza d'onda sarà riflessa sul contatore, lunghezza d'onda che può essere variata ruotando il rivelatore.
- Rivelatore EDS: sfrutta l'interazione energetica tra i raggi X e un opportuno materiale. È caratteristicamente rappresentato da un monocristallo di silicio drogato con litio, rivestito alle due estremità con uno strato conduttivo in oro, mantenuto in alto vuoto e alla temperatura di -192°C con azoto liquido. Il cristallo di germanio ad elevata purezza rappresenta una moderna evoluzione più efficiente. Il principio di funzionamento sfrutta la produzione corrente elettrica, che viene sensibilmente amplificata, generata per interazione tra fotoni e cristallo. Sono i rivelatori attualmente più utilizzati.

Tutto l'apparato del microscopio presenta all'interno un vuoto di 10^{-4} - 10^{-6} mbar generato da una pompa ionica, in modo tale da ridurre le interazioni tra elettroni e molecole gassose, effetto spurio.

Uno schermo fluorescente fornisce la classica immagine generata dal SEM.

Gli elettroni primari del fascio incidente danno luogo ad una serie di effetti:

- emissione di elettroni secondari^{****} e retrodiffusi^{††††};
- emissione di raggi X^{‡‡‡‡} e di un fondo continuo di raggi X (Brehmstrahlung);
- radiazione IR, visibile e UV generata dalla catodoluminescenza;
- effetto Auger (espulsione di elettroni esterni per effetto fotoelettrico intra-atomico);^{§§§§};
- scattering elastico ed anelastico di elettroni;
- trasmissione di elettroni;
- assorbimento di elettroni.

L'analisi EDS sfrutta l'emissione di raggi X di determinata lunghezza d'onda. Essendo di natura elettromagnetica, i raggi X obbediscono con buona approssimazione alla legge di Lambert-Beer.

Quando un fascio di elettroni incide su un campione gli elettroni degli strati K o L vengono espulsi e il sistema assume configurazione ad alta energia. A seguito del rilassamento elettronico, avviene che un elettrone L cade in un orbitale libero dello strato K o un elettrone M torna nel guscio L occupando un orbitale vuoto; l'emissione di energia può seguire due vie: viene emesso un fotone di lunghezza d'onda corrispondente ai raggi X ovvero il quanto di energia genera l'effetto fotoelettrico intra-atomico promuovendo l'espulsione di un elettrone definito *elettrone Auger*.

^{****} causati dalla trasmissione di parte dell'energia di un elettrone del fascio ad un elettrone appartenente ad un atomo del campione. Quest'ultimo elettrone può quindi aver raggiunto un livello di energia tale da poter fuoriuscire dal campione. Gli elettroni secondari generalmente hanno energie molto piccole dell'ordine di 5eV e permettono una ricostruzione topografica della parte più superficiale del pezzo.

^{††††} causati da un elettrone incidente che collide con un atomo del campione. La produzione di elettroni retrodiffusi varia direttamente con il numero atomico della specie chimica del campione.

^{‡‡‡‡} causati dalla perdita di energia di un elettrone del fascio che va ad occupare una posizione lasciata libera da un elettrone emesso. Anche i raggi X forniscono informazioni per la composizione chimica, ma, in questo caso, si hanno informazioni riguardo ad una porzione di spazio più ampia (1-2 μ m)

^{§§§§} conseguenza dell'emissione di un elettrone secondario che può a sua volta eccitare un elettrone più esterno che quindi potrà venir emesso. Gli elettroni Auger, che provengono dagli strati appena sotto la superficie, possiedono una energia relativamente bassa ma caratteristica per ogni elemento chimico.

5.7.2.2 Risultati

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati da analisi equivalenti su campioni di bachelite di altro tipo. Nello specifico si elencano le diverse tipologie di campioni di confronto esaminate e le loro caratteristiche:

- Campione di bachelite pura: non presenta lo strato di olio di lino
- Campione di bachelite pura oliata: bachelite trattata superficialmente con olio di lino

Vedremo dagli spettri dei campioni CC e D le differenze di questi ultimi dai campioni sopraccitati. Da notare che i campioni utilizzati per il confronto provengono da bacheliti non flussate con la miscela gassosa. Tale loro caratteristica è di primaria importanza in quanto ci permette per confronto con i campioni prelevati dalla cameretta irraggiata alla GIF di vedere gli effetti di interazione della miscela con lo strato superficiale della bachelite.

Si riportano quindi di seguito gli spettri caratteristici dei quattro campioni analizzati.

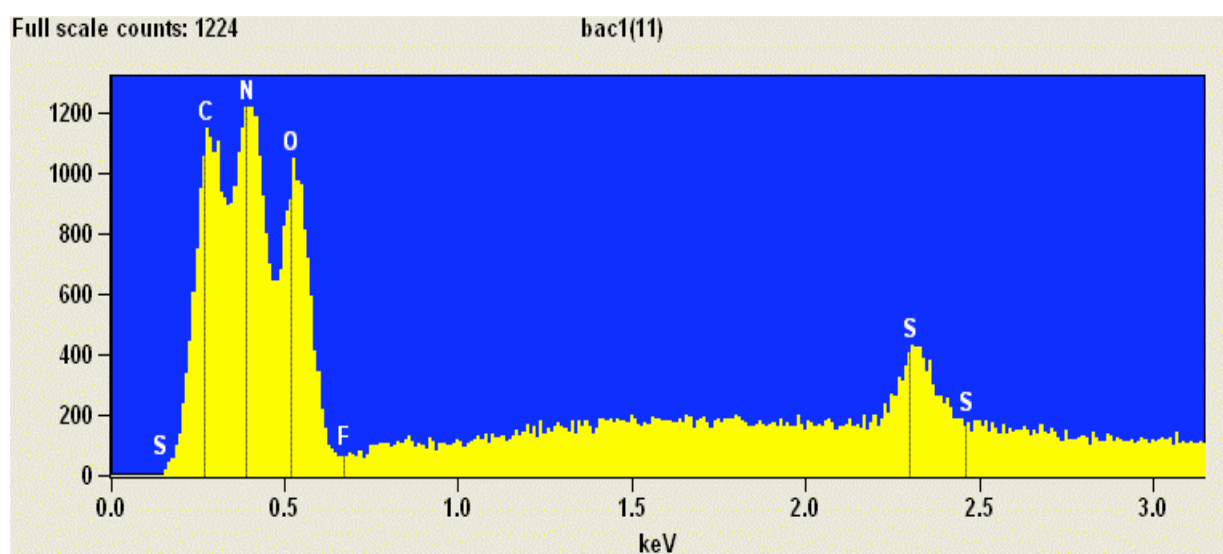


Figura 5.4 Campione di bachelite non oliata, non flussata e non irraggiata

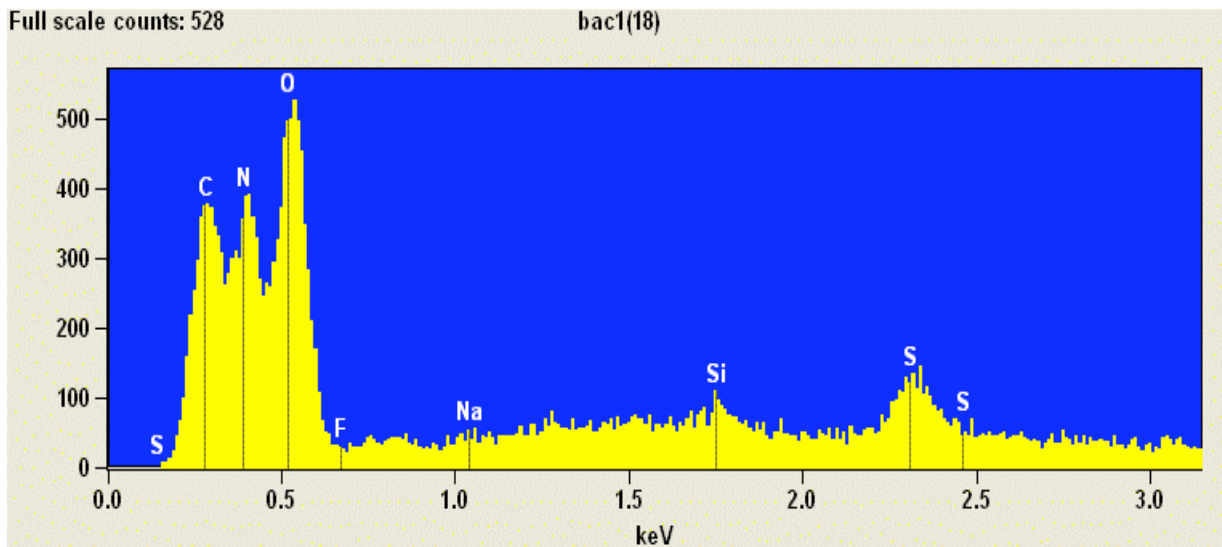


Figura 5.5 Campione di bachelite oliata, non flussata e non irradiata

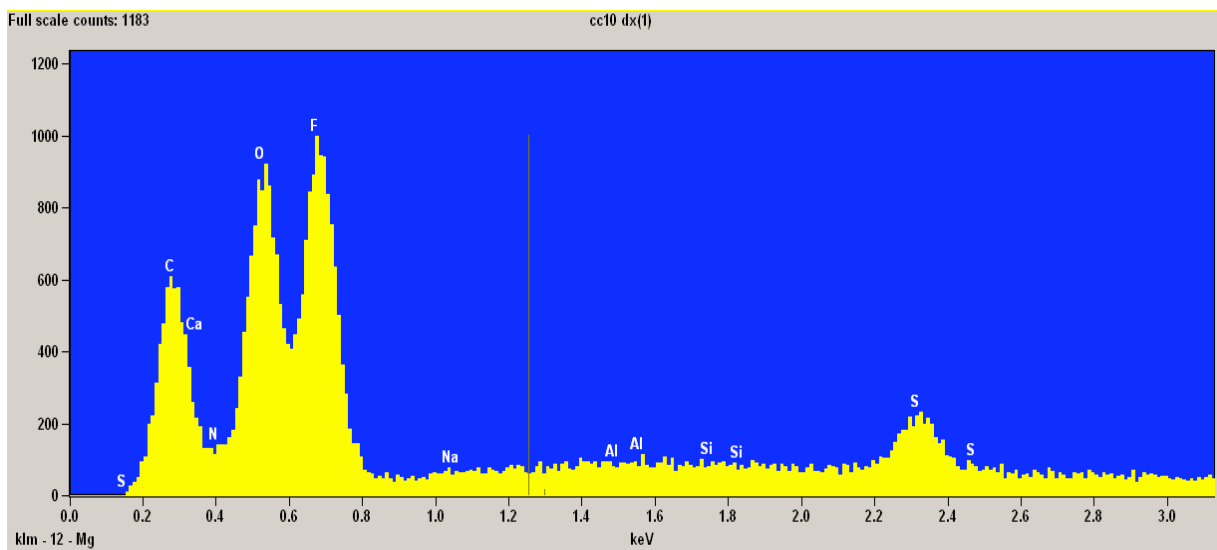


Figura 5.6 Campione CC

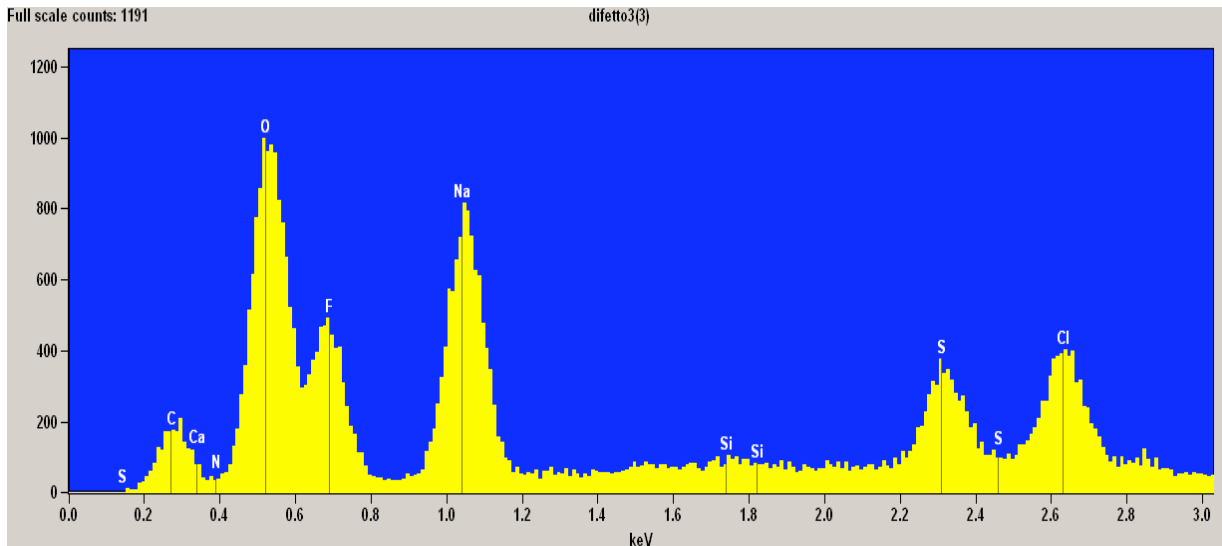


Figura 5.7 Campione D

Dall'analisi dei seguenti spettrogrammi si evidenziano alcuni aspetti particolari. Innanzitutto quelli relativi ai due campioni non flussati e non irraggiati sono qualitativamente simili. La presenza o meno dell'olio di lino non altera lo spettro dal punto di vista composizionale; l'olio di lino infatti un composto organico e pertanto costituito anch'esso degli stessi elementi di cui è composta la bachelite. Guardando sempre i primi due spettri si nota un picco di azoto. Questo è congruente con la presenza nello strato superficiale di melammina.

Venendo invece agli altri due campioni risalta subito la nuova presenza del picco di fluoro, chiaramente dovuto all'effetto del flussaggio della camera con la miscela gassosa che ricordiamo essere composta prevalentemente da freon e da una piccola percentuale di esafloruro di zolfo.

Complementarmente a questo gli altri due aspetti che si evidenziano sono la scomparsa del picco di azoto e la presenza nel campione difettato di sodio.

Il picco di sodio è presente in tutti e quattro i campioni, ma come il picco di cloro visibile nello spettrogramma del campione difettato è dovuto alle cariche utilizzate nel processo di produzione della bachelite. Come si vedrà nelle mappe degli elementi effettuate si evidenzierà la presenza di silicati e di zolfo all'interno della bachelite che rimane comunque un composto di produzione industriale.

La rilevazione di sodio suffraga l'ipotesi della natura cristallina dei difetti, pertanto essi saranno sottoposti nel seguito ad analisi diffrattometrica ai raggi X per vedere di che tipo di cristallo si tratti.

La domanda è allora da dove provenga il sodio, come si vedrà essa sarà in parte spiegata dalle mappe degli elementi.

Sempre utilizzando il SEM sono state poi ricavate delle immagini elettroniche delle superfici; due di esse sono riportate in fig. 5.8. Essi presentano una struttura dendridica^{*****} dispersa su una superficie variabile dipendente da difetto a difetto ma comunque dell'ordine di qualche millimetro.

Si nota inoltre la struttura a cono del difetto con una parte centrale quindi più marcata.

Nella seconda immagine di fig. 5.8 Sono evidenziate delle aree numerate come Area 2, Area 4 e Area 6 nelle quali è stata fatta una analisi degli elementi in esse presenti. Sono aree situate in vari punti del difetto. Gli spettri che seguono sono relativi a tali aree. In esse sono state riscontrate le stesse caratteristiche elementari, seppure nella area 6 emerge più evidente il picco di zolfo, probabilmente a causa della minore presenza di sodio superficiale in quella zona che permette di rilevare lo zolfo presente nella bachelite.

^{*****} In geologia e metallurgia, si chiamano *dendriti* (da *dendron*, che in greco significa "albero") gli aggregati cristallini che presentano una struttura ramificata.

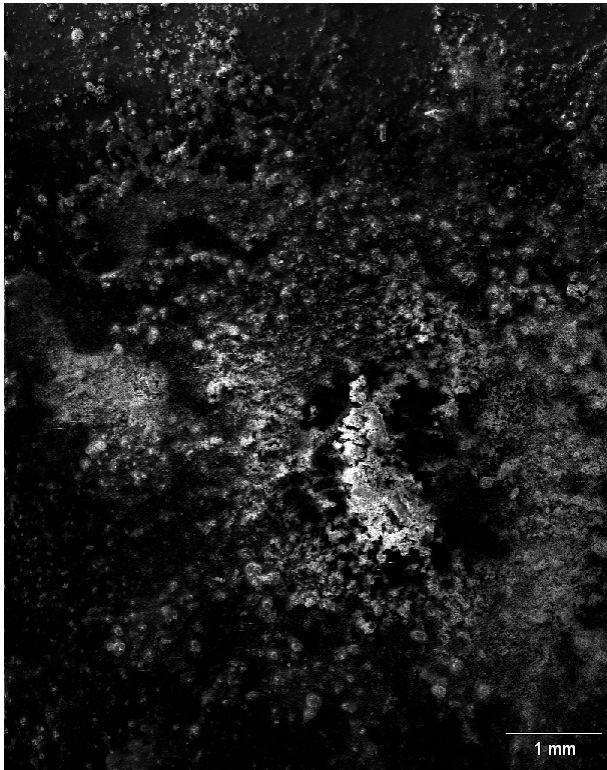


Figura 5.8 Immagine al microscopio elettronico di un'area difettata

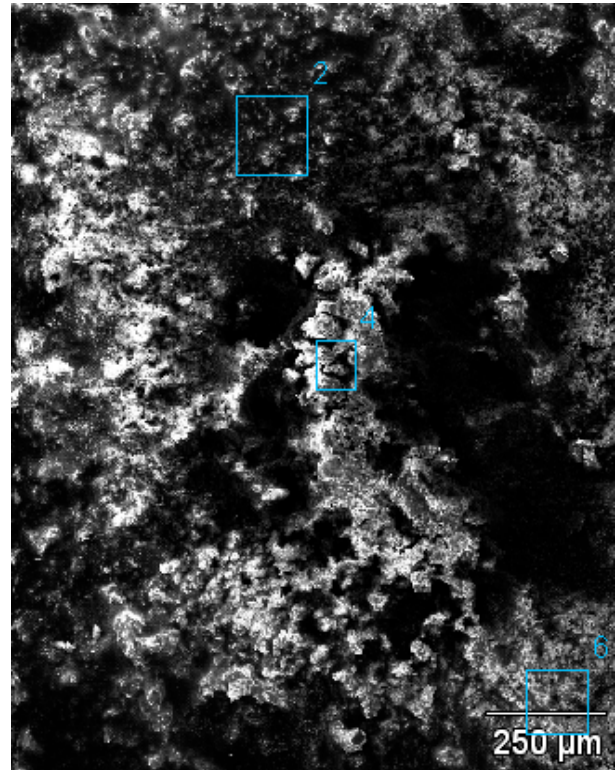


Figura 5.9 Ingrandimento della stessa area con evidenziazione delle aree sottoposte ad analisi EDS

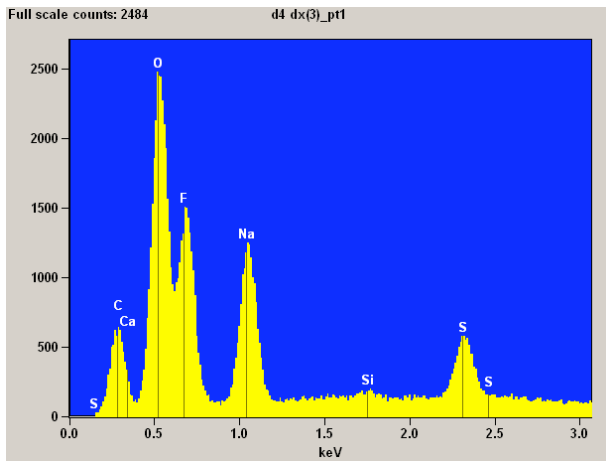


Figura 5.10 Risultati analisi EDS dell'area 2

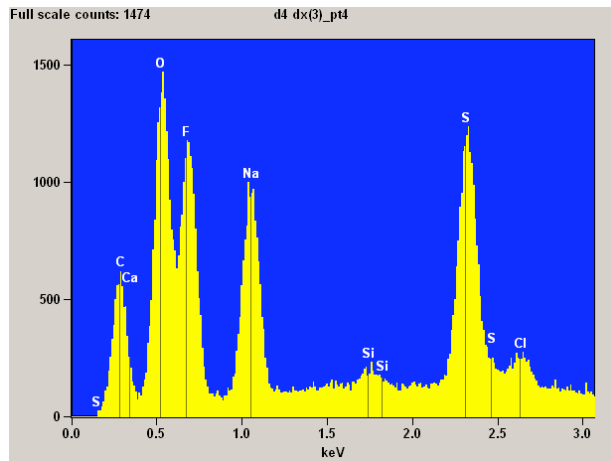


Figura 5.11 Risultati analisi EDS area 4

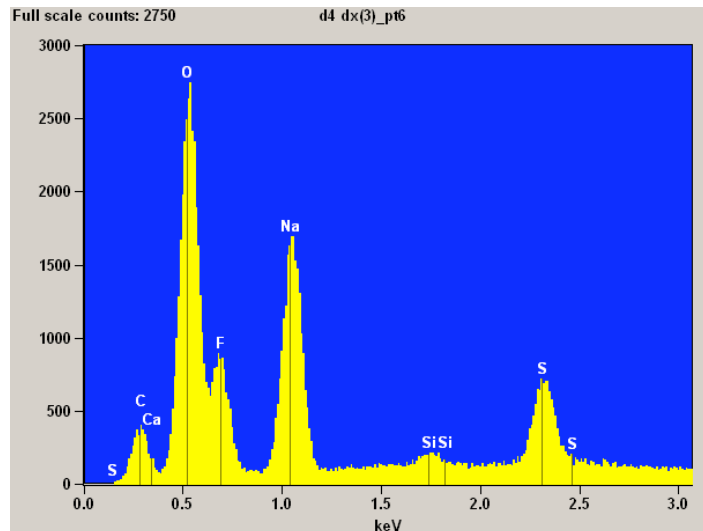


Figura 5.12 Risultati analisi EDS area 6

5.7.3 Diffrazione ai raggi X

Come visto nel corso dell'ispezione visiva prima e dell'analisi SEM/EDS poi, l'aspetto cristallino e la presenza del sodio nei difetti riscontrati sulle superfici interne della gap fanno ipotizzare la natura salina degli stessi. Per tali ragioni è stata eseguita sui campioni difettati una diffrazione ai raggi X per identificare dapprima se effettivamente si tratti di un sale e poi di che tipo.

Come già fatto per la metodologia d'indagine tramite microscopia elettronica anche qui ci da prima una panoramica di quelli che sono i principi generali su cui si basa la tecnica XRD.

5.7.3.1 Principi generali dell'XRD (X-Ray Diffraction)

Il metodo di indagine si basa sull'utilizzo di una radiazione X che incide la superficie di un campione e la cui interazione, con il reticolo cristallino, viene raccolta e registrata da una sonda opportunamente orientata.

Le orientazioni reciproche fascio incidente, campione, sonda sono descritte e regolate da coordinate sferiche nella cosiddetta notazione di Bunge (dal nome dello scienziato che per primo ha

regolamentato l'utilizzo di diffrattometria a raggi X nello studio delle orientazioni cristallografiche dei materiali metallici).

La figura 5.13 mostra uno schema dello spettro di radiazione. Ovviamente, la radiazione X è descritta

dalla relazione $\lambda\nu=c$ (con $c = 2.98 \times 10^8$ m/s), inoltre vale la:

$$E_c = eV = 1/2mv^2$$

Inoltre, la legge di Mosley illustra la dipendenza della frequenza di oscillazione per effetto dell'interazione radiazione-reticolo cristallino:

$$\nu^{1/2} = C(Z - B)$$

con Z numero atomico, C e B costanti dipendenti dal materiale.

La figura 5.13 illustra il meccanismo di emissione della radiazione X da parte del reticolo per effetto dell'energia fornita dalla radiazione catodica incidente. In effetti, quel che viene registrato dalla sonda è l'energia di rilascio degli elettroni dallo stato eccitato a quello di riposo in un orbitale più interno. Tale processo quantistico di rilascio, per il principio di conservazione dell'energia, è accompagnato da emissione di radiazione, essenzialmente nella banda delle frequenze dei raggi X.

Le linee caratteristiche, K, L, M si differenziano per il livello di energia che risulta essere notevolmente più alto per le linee K che, solitamente e per questo motivo, vengono prese in considerazione per l'identificazione delle fasi presenti nel materiale. Per tali linee caratteristiche vale la relazione:

$$eV_{K,L,M} = W_{K,L,M} = h\nu_{K,L,M} = hc/\lambda_{K,L,M} \rightarrow V_{K,L,M} = (12.40 \cdot 10^3)/\lambda_{K,L,M}$$

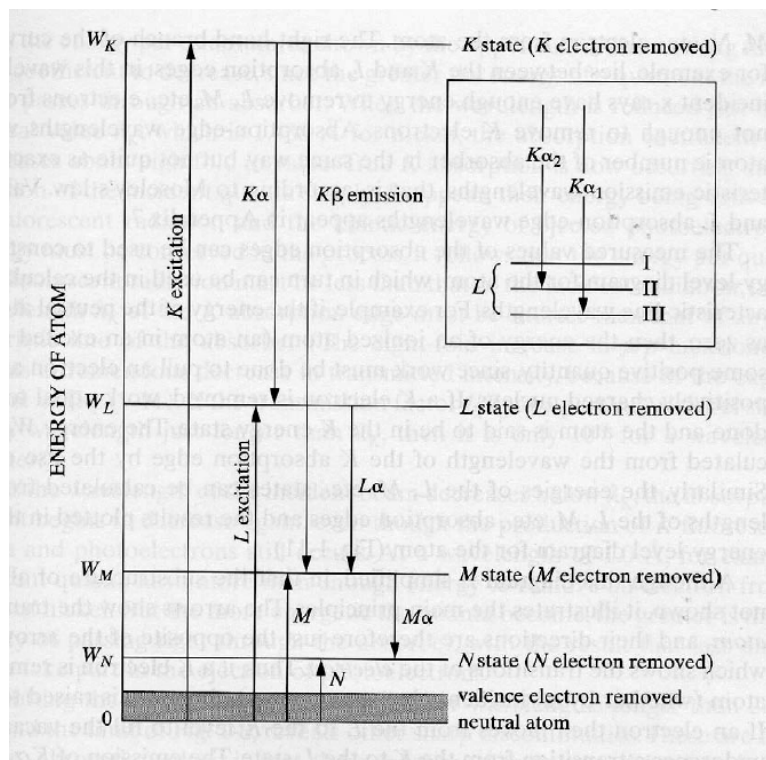


Figura 5.13 Meccanismo di emissione della radiazione X da parte del reticolo per effetto dell'energia fornita dalla radiazione catodica incidente

5.7.3.2 Interazione fascio-campione

La figura 5.14 mostra uno schema del processo di interazione tra il fascio incidente, opportunamente collimato, e la struttura reticolare del campione. Lo strato interessato all'interazione è di qualche decina di micron e l'intero processo, in realtà, si verifica a qualche micron di profondità dalla superficie esterna del campione. Per tale motivo, la preparazione superficiale del campione da sottoporre a diffrazione X non richiede accurate finiture superficiali. Nel caso delle polveri, il processo di interazione interessa più volume del campione e l'acquisizione del segnale necessita qualche piccolo accorgimento di miglioramento dell'efficienza di acquisizione. Il campione prodotto in polvere deve essere prima macinato per raggiungere pezzature non troppo grosse e poter essere, quindi, ridotto in granelli con procedure meccaniche.

Il processo di interazione è regolato dalla legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin \vartheta$$

Dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente, d la distanza reticolare tra piani paralleli e favorevolmente disposti nei confronti della radiazione incidente (ciò vuol dire disposti in modo da rispondere con vibrazioni reticolari in fase e θ è l'angolo di diffrazione.

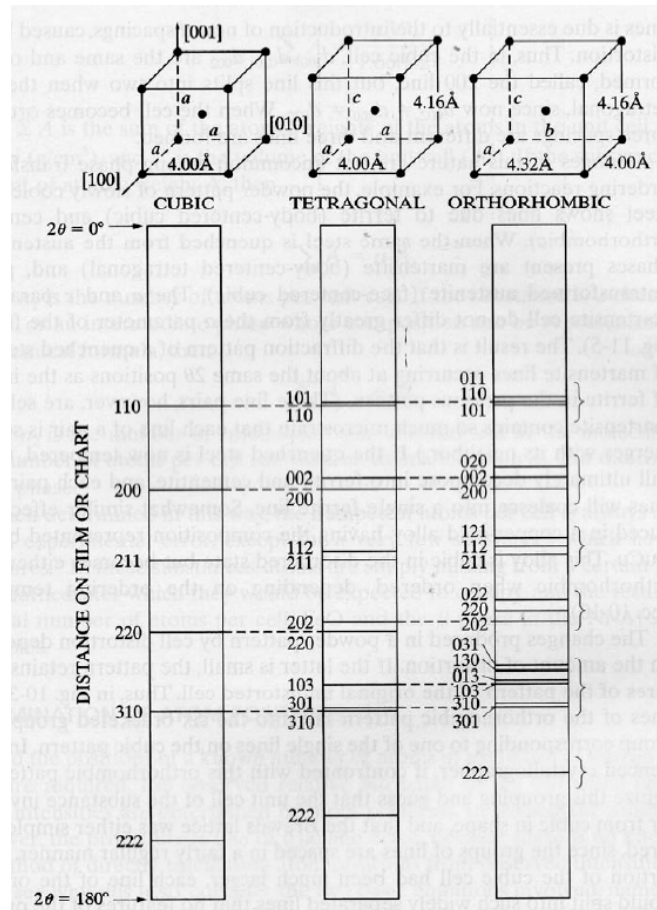


Figura 5.14 schema del processo di interazione tra il fascio incidente, opportunamente collimato, e la struttura reticolare del campione

5.7.3.3 Risultati

Le analisi diffrattometriche sono state effettuate su due campioni di bachelite. Il primo campione è costituito da bachelite oliata, flussata ed irraggiata, ed è un centrocella della gap testata alla GIF. Il secondo invece è un campione D, in cui quindi è presente uno dei difetti coniformi rilevati tramite l'ispezione visiva e fotografati al SEM.

Per determinare la provenienza del sodio sono state poi effettuate delle analisi, cosiddette di linea, su sezioni trasversali di bachelite di un campione D e uno di bachelite oliata, non flussata e non irraggiata.

Prima di essere però analizzati al diffrattometro è stata effettuata anche una ispezione visiva con l'utilizzo dello stereomicroscopio di una sezione di campione difettato. Il campione in questione è stato preparato inglobando un dischetto di campione D in resina epossidica e lavorato successivamente alla macchina lappatrice con carte al carburo di silicio dalla grana 800 alla 2000 (dalla più grossolana alla più fine) man mano che ci si avvicinava alla sezione corrispondente al difetto. Questo tipo di lavorazione richiede un getto d'acqua continuo per lubrificare, evitare il surriscaldamento e facilitare il deflusso del materiale asportato.

Si riporta di seguito un'immagine corrispondente alla sezione di un campione D visualizzata allo stereomicroscopio.

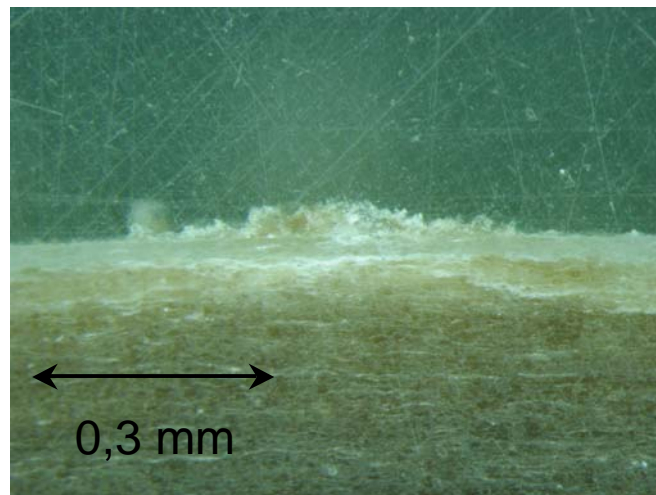


Figura 5.15 Sezione del difetto visualizzata con lo stereo microscopio

Dall'immagine precedente risulta evidente la struttura coniforme del difetto e si apprezza la sua apparenza cristallina. E' interessante notare anche lo strato melamminico all'interfaccia. Dalla scala riportata si deduce anche lo sviluppo in altezza del difetto che è meno di un decimo di millimetro.

A seguire vengono mostrati i due diffrattogrammi ottenuti dall'analisi diffrattometrica per i campioni sopraccitati. La scansione è stata effettuata a partire da un angolo $2\theta = 20^\circ$ a $2\theta = 90^\circ$, con step pari a $2\theta = 0,02$ e un time step di 1 secondo.

Il primo presentato è il diffrattogramma relativo al campione di bachelite oliata di un campione non flussato e non irraggiato:

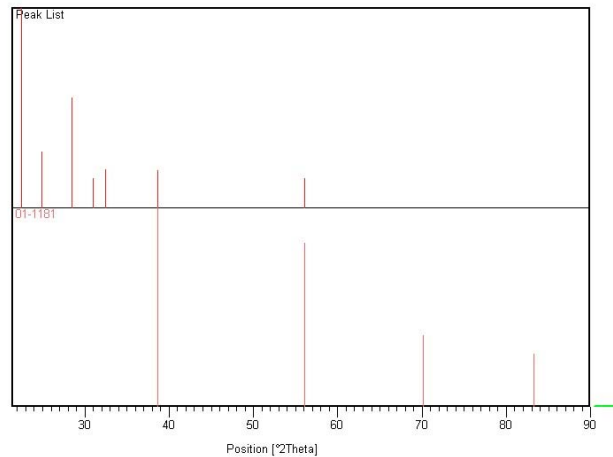


Figura 5.16 Diffrattogramma campione D

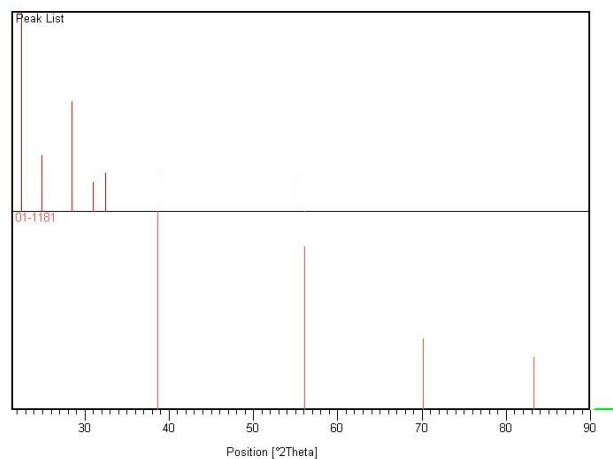


Figura 5.17 Diffrattogramma di un campione di bachelite non difettata

Lo spettro caratteristico per il campione di bachelite in analisi è quello superiore, sotto è invece riportato lo spettro dell' NaF (Fluoruro di Sodio). Il confronto tra i due mostra un matching per i primi due picchi dell' NaF. La soppressione degli altri due è dovuta alla soglia scelta per eliminare

il “rumore di fondo” nello spettro della bachelite e al tempo di scansione del campione troppo basso. Una scansione più lunga permetterebbe ai due picchi di aumentare i conteggi e di emergere. La soppressione degli altri due è dovuta alla soglia scelta per eliminare il “rumore di fondo” nello spettro della bachelite e al tempo di scansione del campione troppo basso. Una scansione più lunga permetterebbe ai due picchi di aumentare i conteggi e di emergere. L’altro aspetto importante da notare è che i primi cinque picchi della bachelite sullo spettro delle bacheliti sono presenti in entrambi i campioni. Ciò dimostra che questi sono caratteristici del materiale. Gli altri due, che sono quelli che coincidono con quelli dello spettro dell’NaF sono presenti invece solo nel campione difettato.

Ciò porta in definitiva ad affermare che la natura di tali difetti è cristallina e che quello che si forma è un cristallo di sodio, la cui provenienza verrà presto chiarita, in combinazione col fluoro del gas della miscela.

5.7.4 Provenienza dell’ Na. Mappatura degli elementi su sezioni di bachelite

Non essendo presente nella miscela gassosa, la presenza di sodio è stata ricercata immediatamente all’interno della bachelite stessa. La ditta produttrice dichiara l’utilizzo di soda (NaOH) per il processo di polimerizzazione della resina durante la produzione. Le quantità utilizzate dichiarate sono dell’ 1% in peso sulla resina e dello 0,02% sul peso del prodotto finito.

Per verifica sono state effettuate delle analisi di linea utilizzando di nuovo l’EDS su un campione di bachelite oliata non flussata e non irraggiata, cioè come essa esce di produzione.

Nella fig. 5.18 è riportato il risultato di tale analisi.

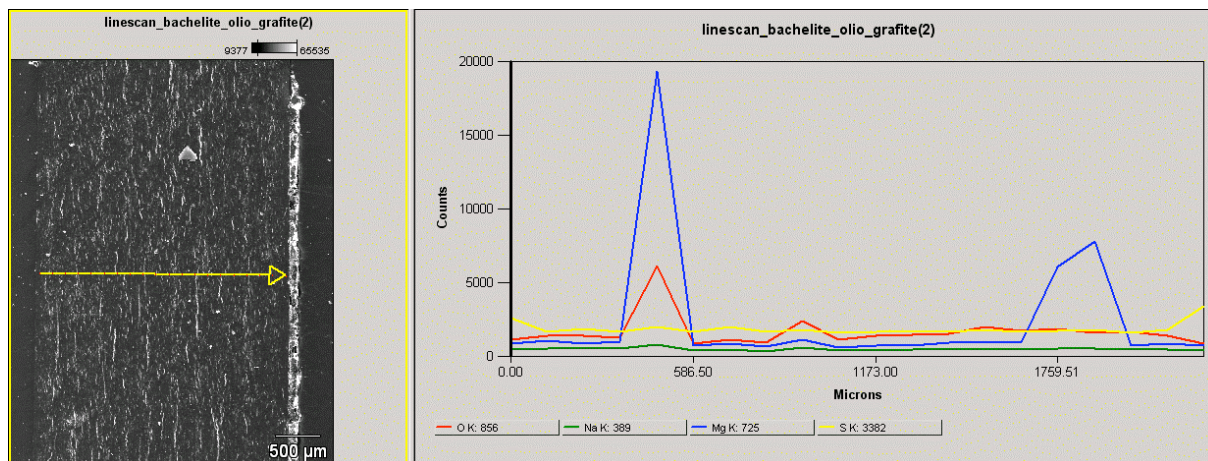


Figura 5.18 Analisi di linea per verificare la presenza di sodio nello spessore

Quello che si nota immediatamente è che il sodio non viene rilevato. Nella figura che riporta il numero di conteggi in funzione dello spessore esso è rappresentato dalla linea verde. Ciò tuttavia non vuol dire che esso non sia presente nella bachelite, quanto piuttosto che, stanti le percentuali di soda utilizzate, esso risulta disperso nel materiale ed in concentrazione al di sotto della sensibilità dello strumento. Le altre curve in figura sono relative ad altri elementi come ad esempio l'ossigeno, o il magnesio la cui presenza è, come già detto, dovuta all'uso di cariche composte anche da silicati durante il processo industriale di produzione.

Molto più interessanti sono invece i risultati ottenuti dalla mappatura degli elementi su una sezione di bachelite difettata proveniente da un campione D. I risultati di tale analisi sono riportati in fig 5.19. Stavolta si nota invece la presenza di sodio alla base del difetto associata a quella contemporanea di fluoro e zolfo. La concentrazione comunque bassa che si riscontra è probabilmente dovuta alla procedura di preparazione del campione con la macchina lappatrice. Come detto infatti, non potendo procedere “ a secco” si utilizza acqua, e questo può aver determinato lo scioglimento del fluoruro di sodio. La presenza di zolfo nella sezione del cono poi fa pensare che l'origine dello stesso sia dovuto ad un effetto estrusivo del campo elettrico a seguito del quale c'è poi stato un effetto di richiamo del sodio nella bachelite causato dalla sua intensificazione in corrispondenza della punta. Si evidenzia infine la presenza di silicati di magnesio dalla corrispondenza delle concentrazioni di magnesio e silicio nelle rispettive mappe.

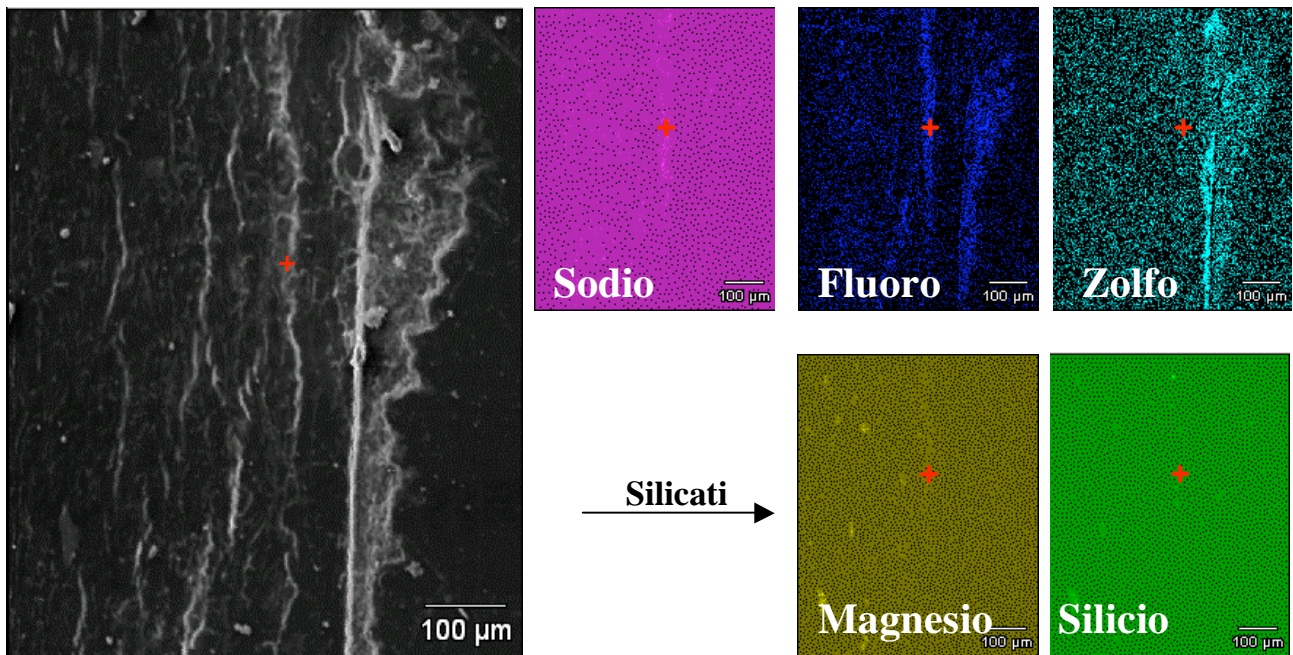


Figura 5.19 Mappa degli elementi effettuata su una sezione di un campione D

5.8 Analisi fluidodinamica dei flussi interni alla gap

Il lavoro di indagine finora svolto è terminato con l'analisi fluidodinamica del moto del gas all'interno della gap irraggiata alla GIF. Tramite essa si è voluta verificare l'efficienza di lavaggio da eventuali inquinanti determinando il campo di moto del gas al suo interno. Questo ultimo studio è risultato importante per due motivi, il primo perché esso è stato correlato alla misura delle abbondanze relative di fluoro sulla superficie interna della gap, il secondo perché le camere del Gas Gain Monitoring System sono geometricamente uguali.

La griglia di calcolo utilizzata è stata costruita utilizzando il pre-processore di derivazione commerciale GAMBIT® mentre come solutore numerico si è fatto uso di FLUENT®.

Sono state costruite quattro griglie di calcolo con densità di mesh crescente per la validazione del modello.

Per semplificare il calcolo e quindi il tempo computazionale richiesto è stato fatto uso di un modello bidimensionale. La costruzione di una griglia di calcolo tridimensionale infatti avrebbe richiesto un numero di nodi enormemente elevato per descrivere correttamente il flusso nello spessore di 2 mm della gap.

Le condizioni di flusso sono quelle dei test alla GIF e delle prove che si stanno svolgendo presso i Laboratori di Frascati sulle camerette del Sistema di monitoraggio del gas e cioè 4 volumi l'ora.

Continuando nelle semplificazioni, essendo la miscela composta per circa il 96% di $C_2H_2F_4$ si è ipotizzato esso come un unico gas nella simulazione.

Data la densità del freon pari a $4,277 \text{ Kg/m}^3$ considerando una portata oraria volumetrica di 4 vol/h (il volume della camera è mezzo litro) si può ottenere la velocità di ingresso utilizzando la ben nota formula:

$$\dot{m} = \rho u A$$

La quale lega appunto la portata in massa alla velocità.

Dando ad A il valore pari all'area di ingresso degli ugelli, il cui raggio è pari a 1mm, si ricava allora:

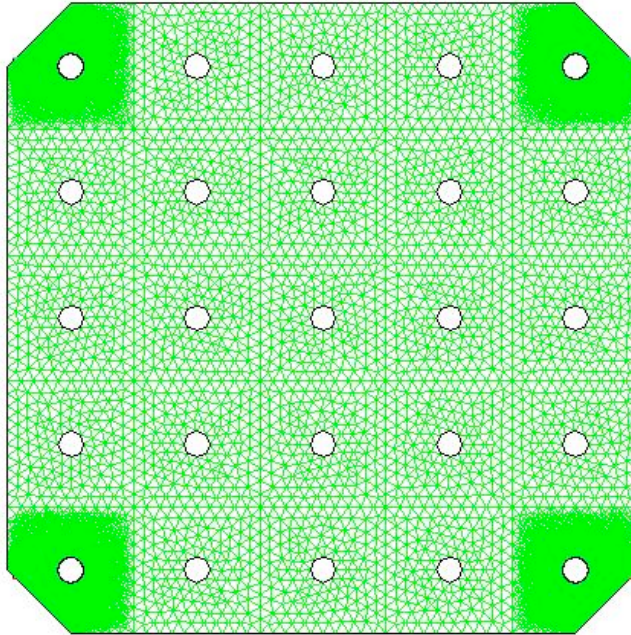
$$u = 0,004 \text{ m/s}$$

Un tale valore di velocità ci permette di semplificare ulteriormente il problema considerando l'ipotesi di flusso incomprimibile ed inoltre laminare.

E' stata eseguita un'analisi a stazionario, e per la validazione del modello si è considerata la convergenza dei tempi di percorrenza lungo quattro linee di corrente originanti da un ugello di ingresso.

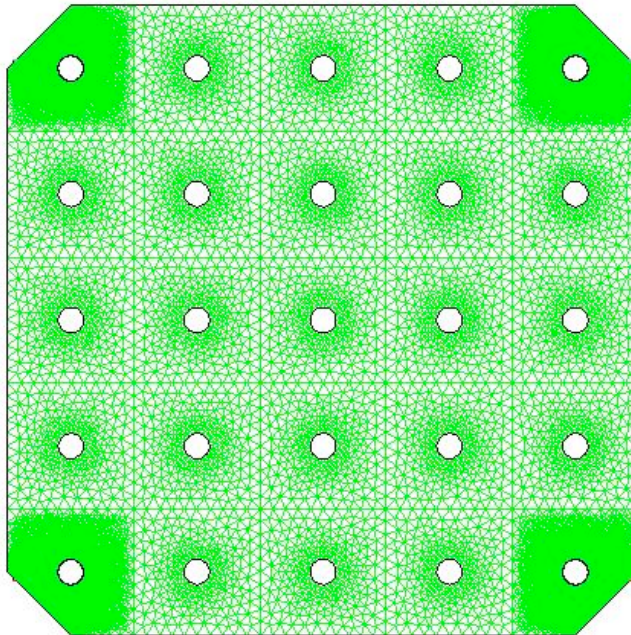
Quelle presentate nelle quattro figure sottostanti sono le griglie di calcolo utilizzate per validare il modello. Esse sono disposte in ordine crescente di infittimento della griglia. Per la loro generazione

è stata utilizzata una paver mesh ad elementi triangolari. Ciò a permesso un notevole risparmio di tempo. DI caratteristiche sicuramente inferiori rispetto ad una mesh strutturata per la sua generazione si è suddiviso il dominio in zone il più regolari possibili imponendo il numero di nodi lungo opportune linee di appositamente disegnate per la costruzione della mesh.



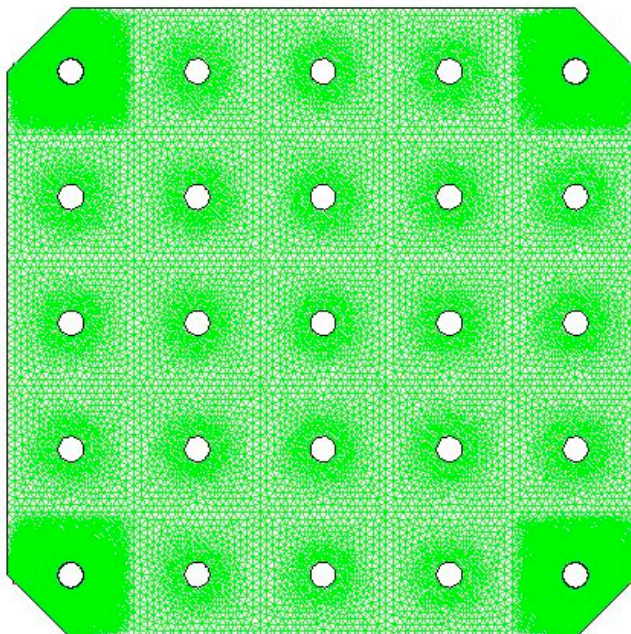
Grid

Oct 17, 2006
FLUENT 6.0 (2d, dp, segregated, lam)



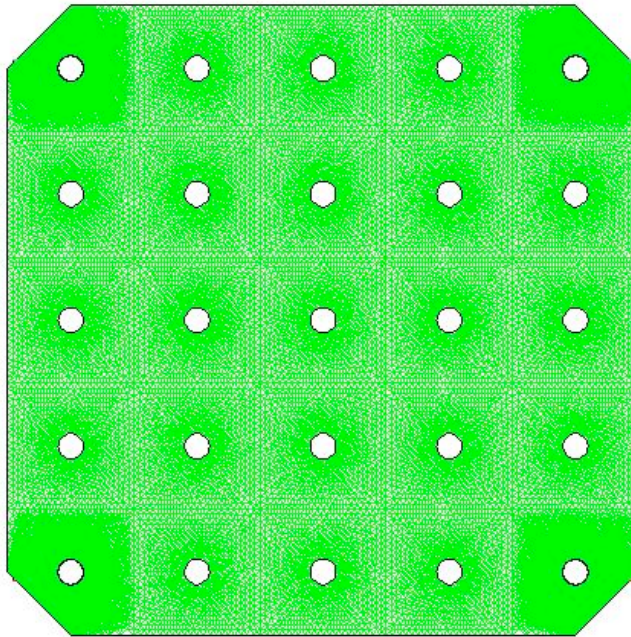
Grid

Oct 17, 2006
FLUENT 6.0 (2d, dp, segregated, lam)



Grid

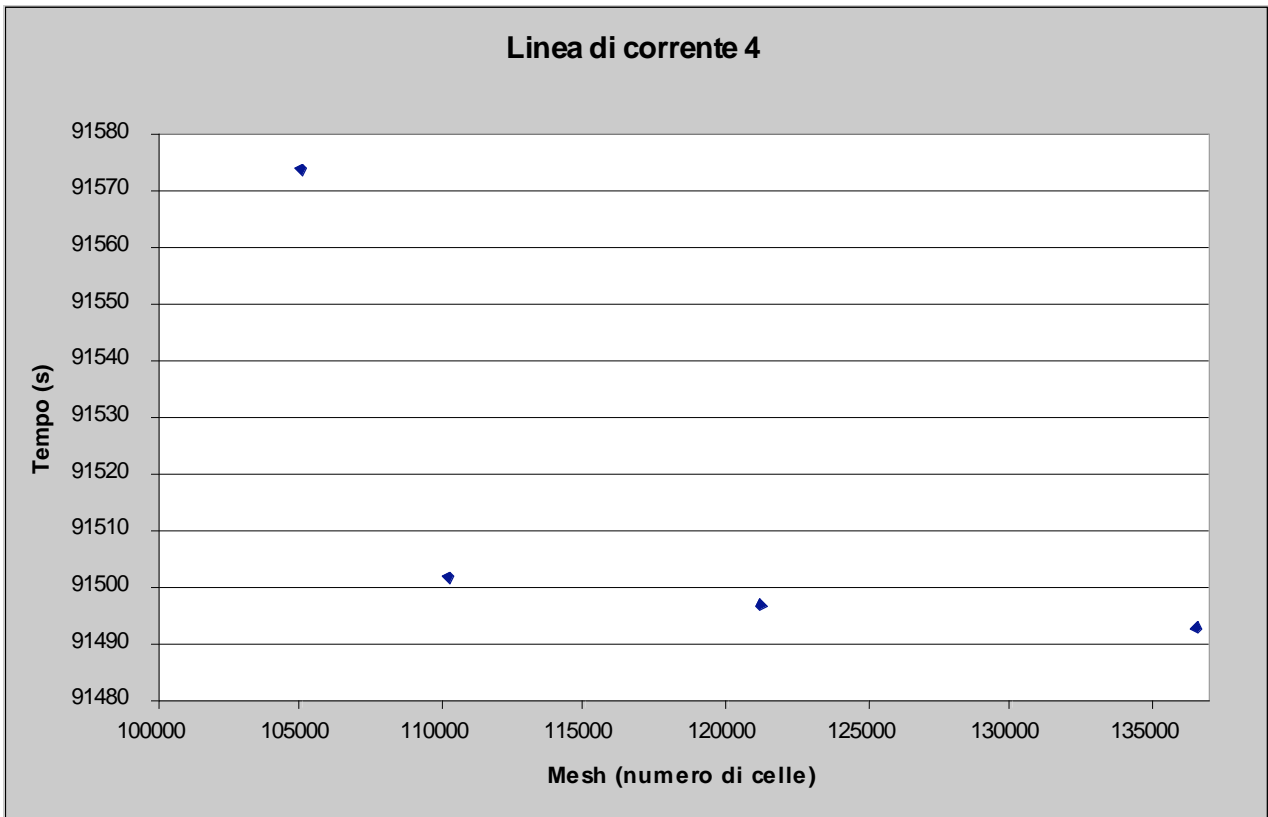
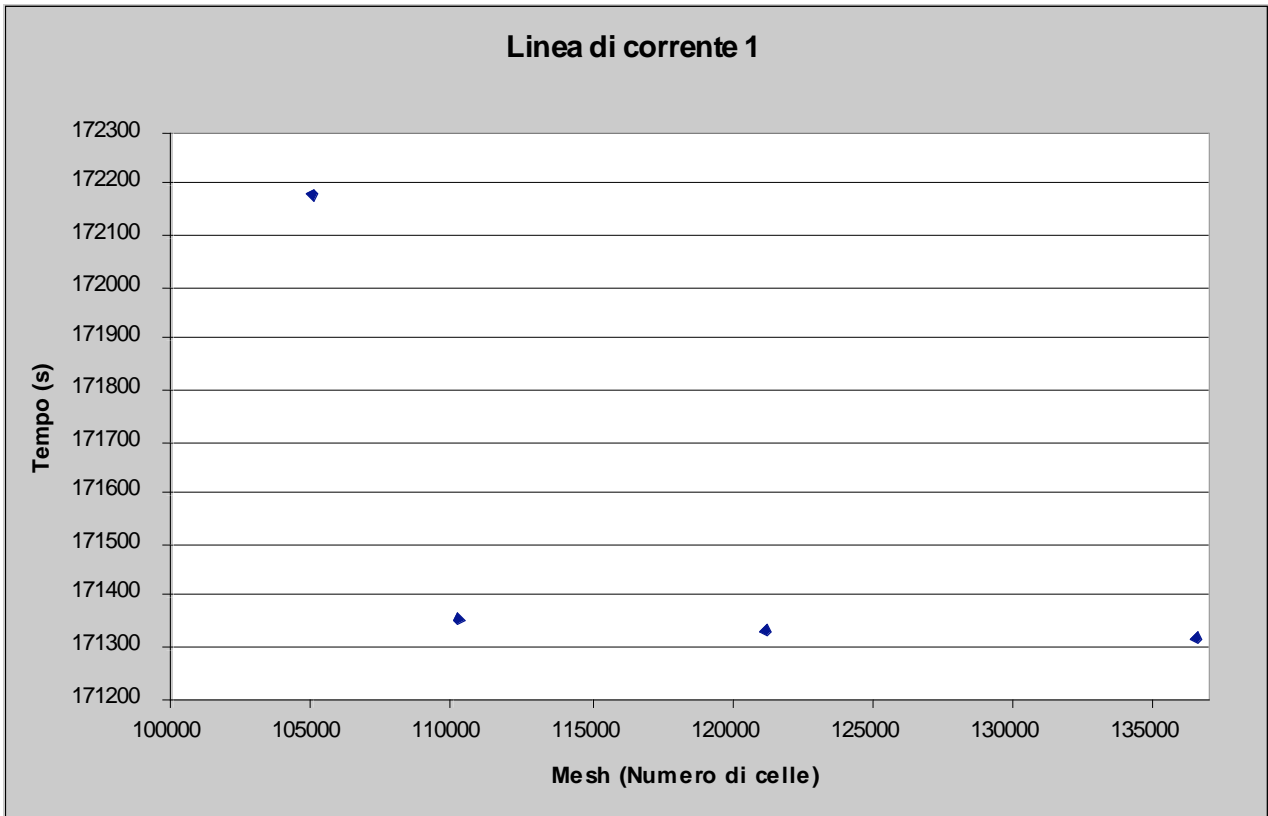
Oct 17, 2006
FLUENT 6.0 (2d, dp, segregated, lam)



Grid Oct 17, 2006
FLUENT 6.0 (2d, dp, segregated, lam)

	Numero di celle
Griglia 1	104980
Griglia 2	110186
Griglia 3	121151
Griglia 4	136550

Per mostrare la convergenza i grafici che seguono sono relativi ai valori del tempo di percorrenza sulla linea di corrente più veloce (quella più a sinistra che indicheremo con 1) e su quella ad essa vicina (che indicheremo con 2) in funzione del numero di elementi della mesh.



I dati mostrano una chiara convergenza come si può vedere in figura 5.X. Tuttavia i valori sono così elevati che se si considera il solo ordine di grandezza (1-2 giorni) sembra conveniente usare indifferentemente uno dei quattro modelli costruiti. Chiaramente ragioni di costo computazionale farebbero protendere verso il modello con minori nodi di calcolo e quindi il primo. Tuttavia la miglior rappresentazione del campo di moto soprattutto in corrispondenza dei distanziatori tende a far cadere la scelta su uno dei tre modelli restanti. Essi infatti hanno subito un infittimento mirato in particolar modo intorno ai distanziatori. La scelta ricade quindi sulla griglia 2, in quanto tra le ultime tre è chiaramente quella che minimizza il tempo di calcolo.

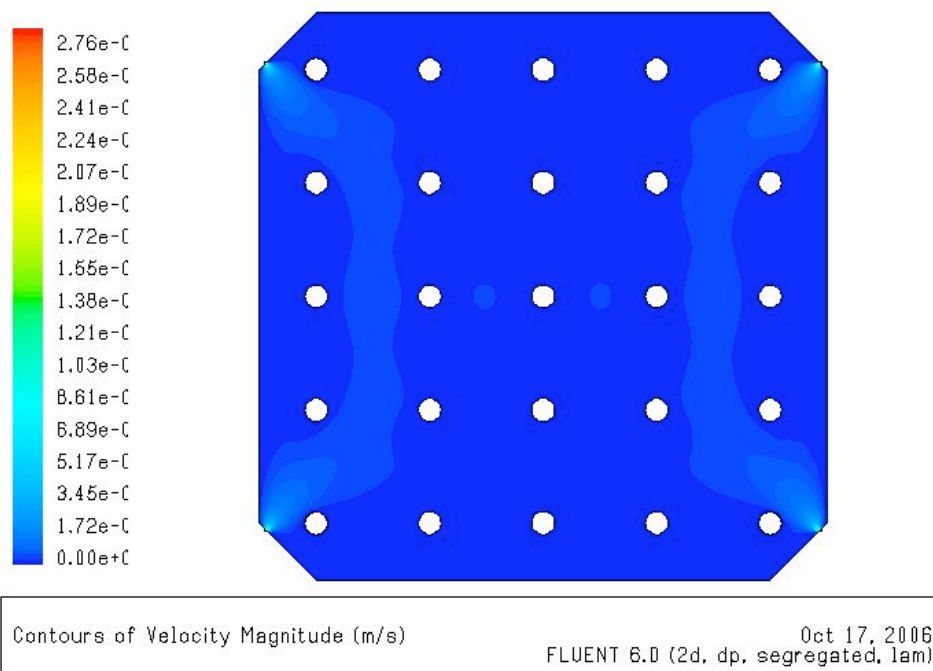
Nelle figure che seguono vengono riportati l'andamento delle linee di corrente e il campo scalare di velocità all'interno della gap. Il risultato delle analisi condotte mostra una velocità pressoché nulla del gas all'interno della gap, tale da non poter considerare trascurabili gli effetti diffusivi di un eventuale inquinante. La linea di corrente corrispondente al tempo di minor percorrenza può in tal caso essere considerata un limite inferiore del tempo di lavaggio della camera.

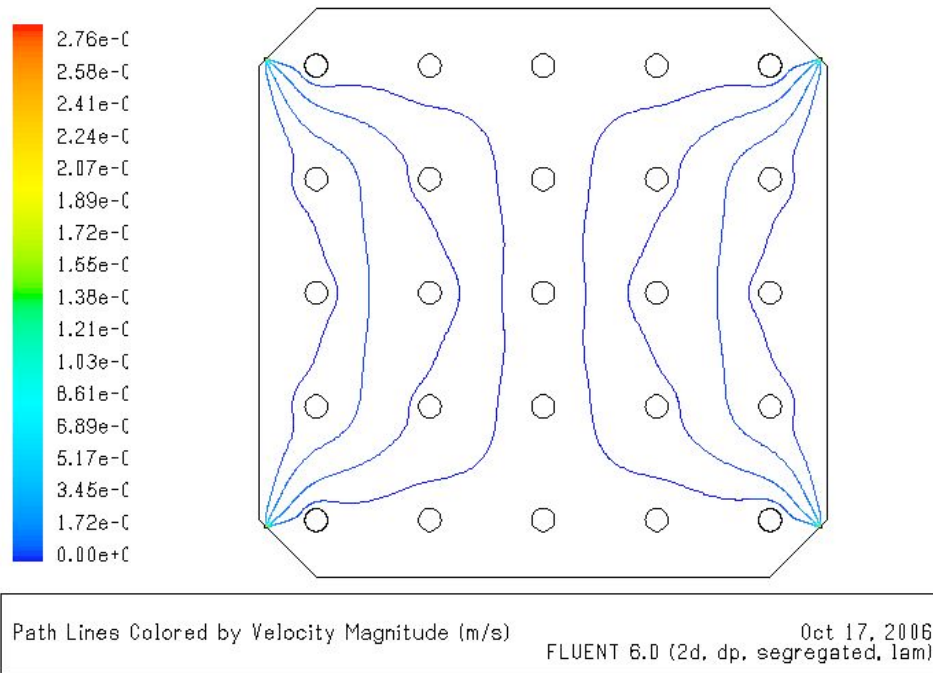
La tabella che segue riporta invece i tempi di percorrenza sulle quattro linee di corrente a partire dalla numero 1 sopra indicata fino alla 4 corrispondente alla griglia 2.

	Tempo di percorrenza (secondi)
Linea di corrente 1	91502
Linea di corrente 2	171357
Linea di corrente 3	200012
Linea di corrente 4	279175

Tuttavia poiché una particella di inquinante non rimarrà mai su di essa per il fatto che essa si sposterà a causa dell'agitazione termica randomicamente impiegherà un tempo sicuramente

maggiore e di non facile determinazione. Risulta chiaro quindi che il problema dell'inquinante, anche a causa dell'avanzato stato di approntamento dell'esperimento, non potrà essere risolto ricorrendo ad esempio ad un aumento della portata in massa. Tale soluzione richiederebbe infatti un nuovo studio globale del sistema di alimentazione del gas e una sua totale riprogettazione, con aumenti dei costi così non sostenibili e comunque fuori tempo per l'inizio delle operazioni di run e raccolta dati previste per settembre 2007.





5.9 Conclusioni

Il sistema di controllo della miscela gassosa per i rivelatori ad RPC da utilizzare nell'esperimento CMS è fondamentale. Il punto di lavoro degli stessi è fortemente influenzato da variazioni nelle caratteristiche dielettriche del gas che sono direttamente riconducibili alla sua variazione composizionale. Tale sistema sarà in grado di lanciare warning in caso di spostamento del punto di lavoro dei rivelatori del telescopio che lo compongono con una sensibilità maggiore ed una risposta molto più rapida di quelli montati su CMS. Essi funzioneranno sotto irraggiamento cosmico e saranno flussati con gas proveniente da varie parti del detector.

Associato a questo sistema è in sviluppo un altro sistema che in parallelo e consequenzialmente al primo sarà composto da strumenti per la valutazione e misura della qualità chimica del gas di

miscela a seguito di sue variazioni. Questo secondo sistema è ancora nella fase di design e di valutazione dei componenti che lo costituiranno che comunque comprenderanno un gas cromatografo e una colonna ionica per la misura della concentrazione degli ioni F^- .

Sono stati presentati i plot preliminari ottenuti durante la fase di valutazione e verifica della prima delle 12 camerette che andranno a completare il sistema di Gas Gain Monitoring ed è stata rilevata l'effettiva capacità di "quenching" dell' SF_6 nell'abbattimento dello streamer in miscele che lo contengono e il miglioramento in termini di risoluzione temporale. Ciò rende però necessario devolvere all'elettronica di front end il lavoro di amplificazione del segnale e quindi la richiesta di un amplificatore le cui caratteristiche ottimali sono tuttora in fase di valutazione.

Aumenti di corrente dopo un intervallo più o meno regolare di test in camere connesse al sistema di closed loop ed in fase di qualifica finale presso l'ISR del CERN hanno condotto ad un monitoraggio giornaliero delle stesse e ad un'analisi dei dati dai quali si è partiti per la comprensione del fenomeno.

La connessione delle camere all'Open Loop Mode determina un immediato abbassamento delle correnti, ragion per cui risulta chiaro che il problema è connesso alla saturazione dei filtri, affermazione suffragata dalla tendenza a diminuire delle correnti anche a seguito della riconnessione delle camere al Closed Loop.

Le ispezioni visive e le analisi SEM/EDS svolte su campioni di bachelite provenienti dalla cameretta irraggiata alla GIF hanno mostrato la presenza di difetti superficiali di aspetto cristallino e la presenza in essi di sodio. Ciò ha condotto alle analisi XRD per la conferma e la determinazione del tipo di cristallo che si viene a formare. Dal confronto con gli spettri di bachelite pura e di altri composti di natura cristallina con composizione elementare data a partire dagli elementi presenti nel gas e nella bachelite ha portato all'identificazione di cristalli di fluoruro di sodio.

Il meccanismo di generazione di tali cristalli non è ancora noto ed è oggetto di studio. La forte presenza di zolfo nel difetto stesso però, fa ragionevolmente ritenere che la presenza di un difetto superficiale o una variazione di composizione media della bachelite porti per effetto del campo

elettrico intenso ad una estrusione del materiale superficiale. La successiva intensificazione del campo in corrispondenza della punta generata favorisce poi la migrazione di ioni Na^+ verso la superficie dove si combina con gli F^- generati dalla ionizzazione del gas e da luogo alle formazioni cristalline viste. La provenienza del Na è poi giustificata dall'utilizzo di NaOH per il processo di polimerizzazione delle lastre che compongono i piatti resistivi. Tuttavia esso non è stato immediatamente rilevato in campioni di bachelite pura in quanto disperso in concentrazioni al di sotto del limite di sensibilità dello strumento con il quale è stata eseguita l'analisi EDS e confermate dalla ditta produttrice.

A conferma invece dell'effetto di richiamo del sodio in corrispondenza dei difetti abbiamo le misure effettuate su campioni di bachelite difettata che ne mostrano, stavolta, una chiara concentrazione alla base degli stessi.

A complemento di queste analisi è stata infine effettuata una simulazione numerica per valutare la capacità di lavaggio interno della camera ad opera del flusso gassoso. I risultati mostrano un flusso pressoché inesistente all'interno della camera nella quale di conseguenza l'unica possibilità di pulizia è legata al trasporto molecolare dell'inquinante nel gas di fondo che costituisce la miscela. E' quindi opportuno ripensare il disegno geometrico e studiare i flussi di massa necessari a garantire un efficiente lavaggio della camere. Tuttavia ciò può solamente essere oggetto di studi di ottimizzazione futuri essendo CMS in fase di installazione e di run iniziale e quindi essendo praticamente nulla la possibilità di un R&D di tale aspetto.

Nel presente lavoro di tesi non è stato possibile presentare i risultati di analisi chimiche in corso sui tre filtri costituenti il sistema di purificazione e su pezzi di rame di tubi di alimentazione.

Infatti è appena terminata la fase tre di una procedura di campionamento volta a prelevare *samples* dei filtri prima dell'inserimento nelle cartucce del sistema di purificazione, dopo la loro saturazione e dopo la rigenerazione.

L'importanza della problematica ha suscitato grosso interesse nella comunità di CMS tanto da riaprire un canale di R&D almeno sullo studio del sistema Closed Loop. Sebbene infatti, procedere

alla periodica rigenerazione dei filtri conduca comunque ad un ottimo funzionamento del sistema di ricircolo, la sua ottimizzazione, che ha dirette ripercussioni di carattere economico, è stata considerata di primaria importanza. Il gruppo RPC Italia ha così ottenuto la disponibilità ad effettuare un ulteriore anno di test prima dell'effettivo lancio dell'esperimento previsto per Settembre 2007.

Capitolo 6

Misura del rate di radiazione cosmica all'interno di moduli spaziali abitati con l'utilizzo di un telescopio a RPC

6.1 La radiazione cosmica

L'esistenza di una radiazione penetrante era già nota, seppure in modo confuso e puramente empirico, sin dalla fine dell'800, quando si studiarono i primi effetti di conduttività elettrica dei gas atmosferici con l'elettroscopio: le foglioline, lasciate a se stesse, una volta terminato l'effetto della carica esterna, si riavvicinavano lentamente. Questa “scarica” dipendeva dalla grandezza dell'elettroscopio ed era proporzionale al tempo, ma, cosa che destò curiosità, non dipendeva dalla quantità di carica presente sulle foglioline; ciò portò all'ipotesi di un possibile nuovo fenomeno sconosciuto.

V.E.Hess studiò questo fenomeno mediante l'impiego di elettrometri in zone lacustri - dove vi sarebbe dovuta essere una contaminazione ridotta, ma non fu notato invece alcun cambiamento - ed all'interno di cave - dove la scarica scompariva. Finalmente, nel 1912, egli risolse il problema mediante i suoi pionieristici esperimenti con camere a ionizzazione, su palloni alla quota di 6 Km dal suolo. Trovò che la ionizzazione, dopo una prima rapida riduzione, dovuta al calo della radioattività proveniente dal suolo, aumentava considerevolmente con l'altezza, a testimonianza che le sorgenti di tale radiazione non erano da cercarsi nell'ambiente terrestre. La prima ipotesi avanzata fu che i "raggi cosmici" (denominazione introdotta dalla stampa attorno al 1914) fossero raggi γ di altissima frequenza; lo sviluppo di nuove tecniche di rivelazione portò rapidamente al ripudio di quest'ipotesi ed alla nascita della fisica sperimentale delle particelle elementari.

Fu stabilito che i raggi cosmici osservati nell'atmosfera sono secondari, prodotti dall'interazione di primari di alta energia con i nuclei atomici degli strati superiori dell'atmosfera stessa. A definire la natura dei primari, contribuirono, negli anni '30, misure a varie longitudini e latitudini, sia a livello del mare sia a quote di palloni. L'intensità ad alte latitudini risultava maggiore di quella misurata nella zona equatoriale e quella proveniente dalla porzione ovest del cielo aveva intensità superiore di quella proveniente da est; l'entità di questa asimmetria aumentava andando dal polo all'Equatore.

Alla fine degli anni '30 P.V.Auger ed i suoi collaboratori scoprirono l'esistenza di sciame estesi atmosferici (EAS): numerosi secondari arrivavano simultaneamente su rivelatori separati anche di alcune centinaia di metri. Questi sciame risultavano prodotti da un unico primario di energia superiore a 10^{15} eV. Oggi sappiamo che lo spettro energetico della radiazione cosmica si estende fino ad energie molto più elevate. Dopo il miglioramento delle tecniche di rivelazione dovuto a B. Rossi ed ai suoi collaboratori, nel 1963 fu osservato dal rivelatore "Volcano Ranch" uno sciame di energia pari a 10^{20} eV. Lo sciame con energia più elevata, pari a 3.2×10^{20} eV, è stato osservato dal rivelatore "Fly' s Eye" in Utah.

Fino all'avvento dei grandi acceleratori, l'unica sorgente di particelle elementari di alta energia era la radiazione cosmica secondaria: sono state individuate molte particelle instabili ed è stata

formulata la teoria delle interazioni nucleari e confrontata con lo sviluppo delle componenti secondarie. La scoperta delle variazioni temporali dell'intensità della radiazione cosmica, collegata ai fenomeni dell'attività solare, ha reso tale radiazione anche un utile strumento per lo studio della fisica del Sole e dello spazio interplanetario. Eppure l'origine dei raggi cosmici è tuttora un mistero a tutte le energie.

Il lavoro di ricerca sulla loro origine si propone principalmente di comprendere i meccanismi di accelerazione di queste particelle in sorgenti astrofisiche e la successiva propagazione nel mezzo interstellare ed intergalattico. Si ipotizzano due sorgenti di raggi cosmici primari: la prima, quella del flusso di particelle ad alta ed altissima energia, è costituita da remoti oggetti galattici ed extragalattici; la seconda, quella del flusso di energia più basso, è chiamata “vento solare” che scompare durante il periodo di quiete del Sole e costituisce una vera e propria tempesta di particelle durante i periodi di attività solare. Per i raggi cosmici ad alta energia, possibili sorgenti all'interno della nostra Galassia sono le esplosioni di supernovae, le pulsar ed il nucleo galattico stesso. Sorgenti extragalattiche possono essere radio-galassie, quasar, stelle a neutroni e buchi neri. Devono poi esistere meccanismi che accelerano i raggi cosmici fino a far loro raggiungere le altissime energie a cui vengono osservati. Il primo meccanismo fu proposto da E.Fermi, secondo il quale essi vengono accelerati dagli urti con nuvole di polvere magnetizzata presenti nella Galassia. Un modello di accelerazione diretta presuppone invece che tali particelle siano accelerate da campi magnetici rotanti molto intensi, quali quelli attorno alle stelle a neutroni o ai dischi di accrescimento dei buchi neri. Altri modelli, invece, suppongono che i raggi cosmici di alta energia siano il prodotto di particelle esotiche supermassive. La radiazione cosmica si propaga nello spazio interstellare ed intergalattico, interagendo con la polvere, il gas interstellare, i campi magnetici galattici e, sopra una certa energia, con la radiazione fossile.

6.2 Raggi cosmici primari e secondari

La radiazione cosmica dalla sua origine alla sua eventuale rivelazione interagisce con la materia ed i campi in cui si propaga e spesso conserva traccia delle avvenute interazioni; in esse si producono componenti secondarie, che segnalano la presenza della radiazione medesima e possono dare informazioni sul mezzo stesso (radiazione di sincrotrone e Bremsstrahlung, raggi γ , neutrini, nuclidi radioattivi, ecc).

Con il termine raggi cosmici si definiscono sia le particelle (cariche stabili, per il 92% protoni e per il 6% particelle α , e nuclei con tempi di vita medi dell'ordine di 10^6 anni o più) e le radiazioni elettromagnetiche di alta energia di origine extraterrestre incidenti sulla sommità dell'atmosfera ("primari") sia le particelle e le radiazioni elettromagnetiche prodotte dall'interazione di detti primari con i nuclei dell'atmosfera ("secondari"). Tra i secondari figurano tutte le particelle elementari con vita media sufficientemente lunga da essere osservabili.

La probabilità di interazione, infatti, è tanto maggiore quanto maggiore è lo spessore di materia attraversato, definito come la massa di una colonna di area unitaria misurata in g/cm^2 . Nel mezzo interstellare la densità di materia è talmente piccola che, anche nell'attraversamento di alcuni parsec^{††††}, lo spessore di materia è meno di un 1 g/cm^2 , mentre quello dell'atmosfera terrestre è di 10^3 g/cm^2 . ††††

Nell'interazione di un primario con i nuclei dell'atmosfera, questi ultimi (e in genere anche il primario stesso se non è un protone) si frantumano dando origine ad una stella di prodotti. La maggior parte dei nuclei pesanti si frammenta nella prima interazione che avviene ad un'altitudine maggiore di quella dei protoni, poiché hanno una sezione d'urto σ_i maggiore e corrispondentemente un più breve cammino libero medio. La relazione tra la sezione d'urto ed il cammino libero medio è, infatti, quella che segue:

†††† 1 Parsec = $3.08568025 \times 10^{16}$ metri

†††† Nella Fisica dei raggi cosmici, l'altitudine è usualmente espressa in unità di g/cm^2 ; per esempio, il livello del mare ha un'altitudine di 10^{33} g/cm^2 equivalente a 1013 mbar

$$\lambda_i^{-1} = \frac{N_A}{A} \sigma_i \quad [\text{g/cm}^2]^{-1}$$

In essa, N_A è il numero di Avogadro, A è il numero atomico del bersaglio, σ_i è la sezione d'urto per le particelle di interazione, λ_i è il cammino libero medio di interazione.

Il cammino libero medio per i nuclei pesanti è di circa 23 g/cm² e quindi la probabilità che arrivino al livello del mare è praticamente nulla; le particelle α hanno anche esse un breve cammino libero medio pari a circa 25 g/cm², mentre i protoni circa 70 g/cm², quindi, in genere, è altamente improbabile che particelle appartenenti alla radiazione primaria arrivino sulla superficie terrestre. Le particelle secondarie possono, a loro volta, interagire con i nuclei dell'atmosfera terrestre e, se instabili, anche decadere in altre particelle se la loro lunghezza di decadimento $c\tau$ (con τ vita media e c velocità praticamente coincidente con quella della luce) è inferiore al cammino libero medio (che è funzione della densità del mezzo attraversato).

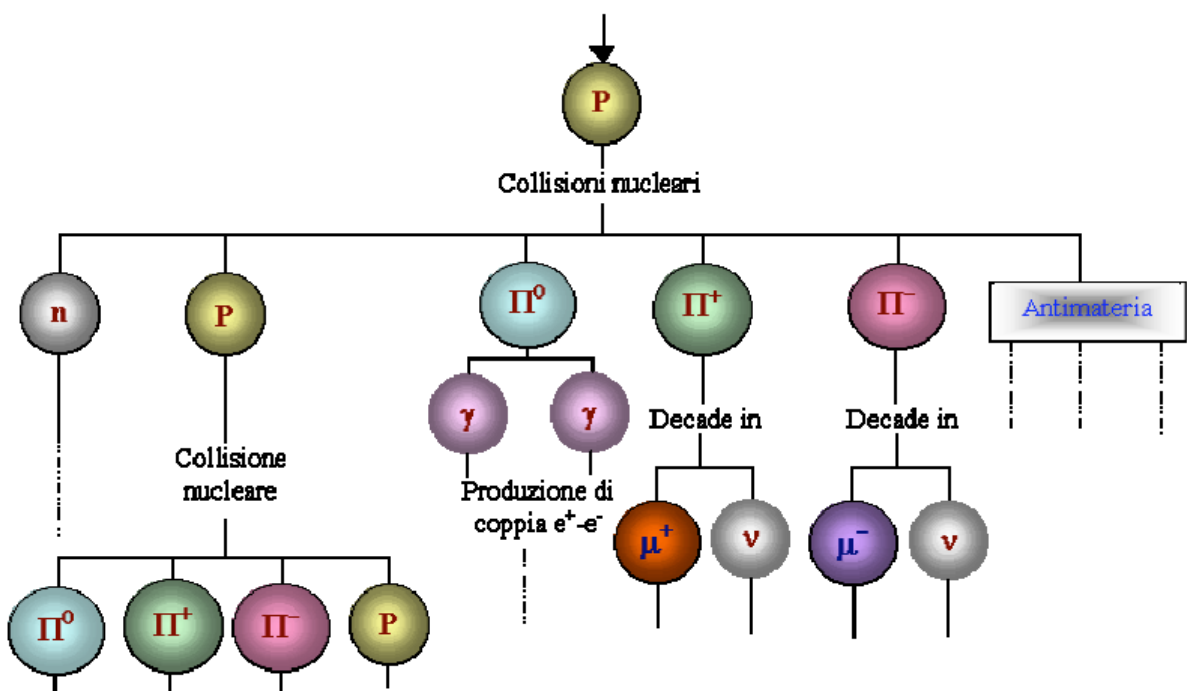


Figura 6.1 Particelle generate per cascata da un “primario” di radiazione cosmica

Nella figura precedente è rappresentata la discendenza di una particella della radiazione cosmica. La particella primaria (in genere un protone) urta un nucleo di ossigeno o di azoto dell'atmosfera. I prodotti comprendono neutroni n , protoni p , mesoni π carichi e neutri, antiprotoni e antineutroni, mesoni pesanti K ed iperoni Y . I mesoni carichi possono colpire altri nuclei atmosferici o decadere in muoni (μ^+ , μ^-) e neutrini ν . Gli elettroni irradiano parte della loro energia sottoforma di raggi γ (“Bremsstrahlung”). La maggior parte delle particelle cariche in arrivo sulla superficie della Terra sono elettroni, positroni e muoni μ . L'intensità dei raggi cosmici secondari dipende quindi dalla pressione atmosferica (effetto barometrico) e dalla temperatura (effetto termico).

È noto sperimentalmente che la radiazione cosmica secondaria è composta da una “componente nucleare attiva”, detta anche “nucleonica”, in quanto composta principalmente da neutroni e protoni, una “componente penetrante o muonica” ed una “componente molle o elettrofotonica” (e^- , e^+ , γ).

La componente nucleare attiva, primaria e secondaria, produce, mediante successive interazioni, una cascata di secondari nella quale sono particolarmente numerosi i mesoni π , carichi e neutri.

Per basse energie dei primari (inferiori a 10^{10} eV), la cascata di secondari si estingue dopo poche generazioni e solo qualche secondario arriva al suolo. Ad energie via via maggiori, la cascata di secondari è sempre più ricca di particelle che possono propagarsi sino al suolo, dando origine agli “sciame estesi atmosferici”.

Poiché ad alte energie le particelle conservano la direzione di quelle che le hanno prodotte, al suolo uno sciame è riconoscibile come un eccesso di particelle quasi parallele, incidenti simultaneamente su vaste aree.

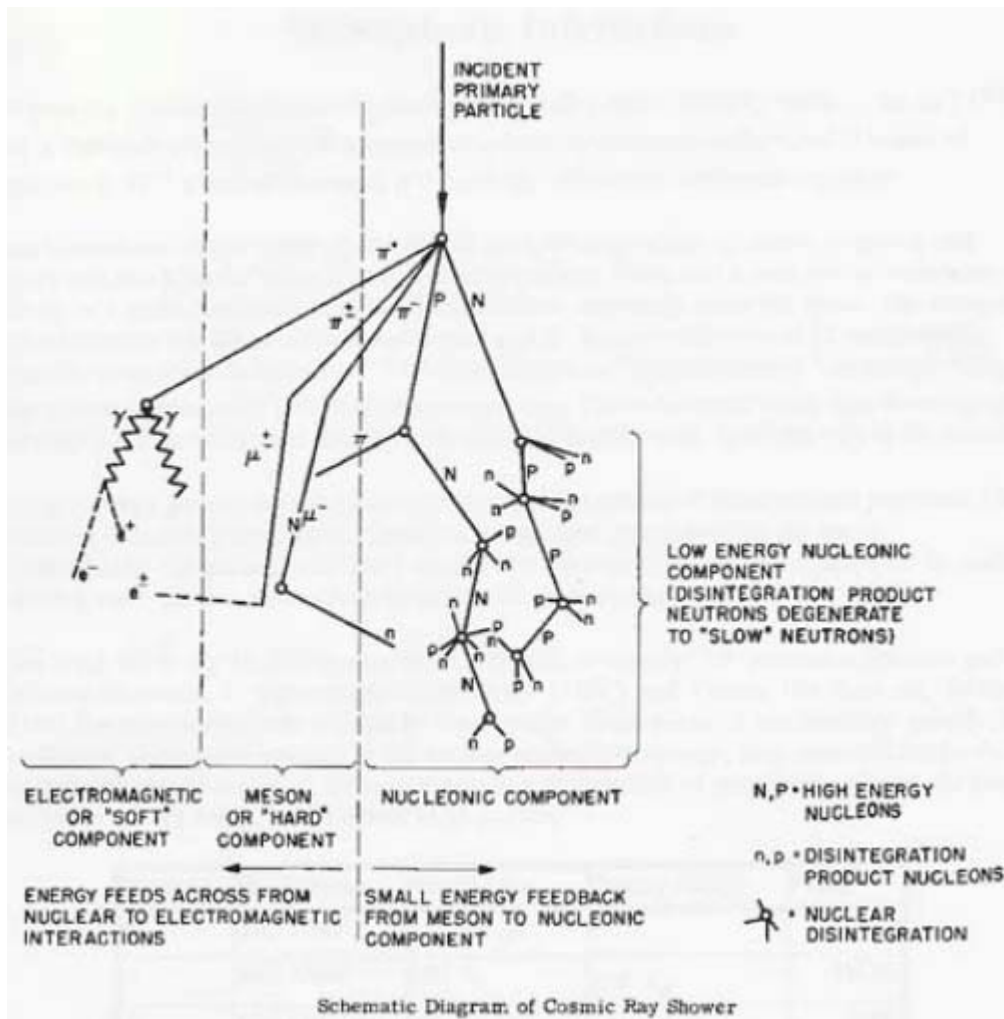


Figura 6.2 Schema di generazione della componente secondaria di radiazione cosmica a partire da quella primaria

Attraversando il nostro corpo, le particelle risultanti dall'interazione dei cosmici con l'atmosfera, producono ioni, e provocano la rottura di legami chimici, ma in misura tale da non infliggere alcun danno. Ogni essere umano assorbe ogni anno una dose di radiazione cosmica pari a circa 0,03 Rem^{§§§§§} (a seconda dell'altitudine): l'equivalente di due lastre al torace.

§§§§§ è la dose di radiazioni ionizzanti che, assorbita dal corpo umano, produce un effetto biologico identico a quello prodotto nello stesso tessuto dall'assorbimento di raggi X o gamma. Questa grandezza è molto importante perché le radiazioni ionizzanti di caratteristiche diverse, come i raggi alfa o X, possono provocare effetti biologici diversi pur dando luogo alla stessa dose assorbita. Il valore dell'equivalente di dose si ottiene moltiplicando la dose assorbita per un fattore numerico caratteristico del tipo di radiazione ionizzante (fattore di qualità). L'equivalente di dose si misura in rem (röntgen equivalent man) (1 rem = 1 rad x fattore di qualità) e indica la quantità di radiazioni ionizzanti che, a parità di altre condizioni, producono lo stesso effetto biologico di 1 röntgen. 1 rem è la dose biologica assorbita da un organismo vivente dovuta a 1 rad. L'unità di misura SI è il sievert (Sv) (1 Sv = 1 Gy x fattore di qualità). 1 Sv è l'equivalente di dose che si verifica quando la dose di radiazioni assorbita, moltiplicata per un dato fattore adimensionato, è uguale a 1 J/kg. 1 Sv = 100 rem. 1 rem = 0,01 Sv.

Al di fuori dell'atmosfera, però, il bombardamento dei raggi cosmici è molto più intenso: nello spazio, il corpo di un astronauta sarebbe attraversato ogni secondo da un totale di circa 5000 ioni (protoni o nuclei più pesanti). Ogni ione lascerebbe dietro di sé una scia di legami chimici spezzati e produrrebbe lo stesso effetto a cascata che normalmente provoca nell'atmosfera. I nuclei più pesanti, relativamente scarsi all'interno della radiazione cosmica, producono danni uguali o persino maggiori dei protoni, perché la capacità di rompere legami chimici è proporzionale al quadrato della carica elettrica. Per esempio un nucleo di ferro, che ha numero atomico 26, provoca danni 676 volte maggiori rispetto a un protone. Esposizioni di una settimana o di un mese non costituirebbero un problema, ma un viaggio di due anni fino a Marte e ritorno sarebbe tutta un'altra storia. Secondo le stime della NASA, ogni anno circa un terzo del DNA presente nell'organismo di un astronauta subirebbe danni provocati dai raggi cosmici.

Le sole informazioni disponibili sulle conseguenze biologiche di una esposizione a radiazioni ad alta energia provengono dalle vittime di esplosioni nucleari e incidenti di laboratorio. Queste persone, che sono state esposte ad intense irradiazioni di raggi gamma e particelle ad alta velocità, hanno riportato danni cellulari e un aumento dei rischi di tumori. Chi si recasse su Marte sarebbe esposto ad una dose simile, anche se diluita nel tempo. Non si sa se le due situazioni siano equivalenti, né se i meccanismi biologici di riparazione sarebbero in grado di stare al passo coi danni. Dell'argomento si è occupato di recente il gruppo di Wallace Friedberg al Civil Aerospace Medical Institute di Oklahoma City. In una relazione pubblicata lo scorso anno, Friedberg sostiene che un astronauta in viaggio verso Marte riceverebbe una dose superiore a 80 Rem all'anno. Per fare un paragone, negli Stati Uniti il limite di legge per i lavoratori degli impianti nucleari è di 5 Rem all'anno. Fra gli astronauti maschi, uno su dieci morirebbe di cancro, mentre fra le donne la proporzione salirebbe ad una su sei, a causa della vulnerabilità al tumore al seno. I nuclei pesanti potrebbero inoltre causare cataratte e danni cerebrali.

La pioggia costante di raggi cosmici non è però l'unica delle minacce: anche il sole è in grado di produrre tremende irradiazioni di protoni e nuclei più pesanti a velocità prossime a quelle della luce.

Durante queste esplosioni occasionali si può arrivare ad emissioni di oltre 200 Rem in un'ora, una dose che sarebbe letale per un astronauta privo di protezioni. Qualsiasi protezione fosse adottata contro i raggi cosmici, dovrebbe essere in grado di schermare anche da queste tempeste solari, anche se sarebbe comunque più sicuro programmare un eventuale viaggio su Marte negli anni in cui l'attività solare è meno intensa.

6.3 Composizione della radiazione cosmica primaria

Per i raggi cosmici con energie fino a 10^{14} eV, lo studio della composizione è eseguito con rivelatori posti su satellite o su palloni ad alta quota. In questo intervallo energetico, circa l'85% dei raggi cosmici è costituito da protoni, il 12% da nuclei di particelle α , il 2% da elettroni e l'1% da nuclei pesanti e piccole percentuali di neutrini e fotoni.

Dal confronto delle abbondanze dei vari nuclei nella radiazione cosmica (fig. 7.X), emergono forti analogie con le abbondanze chimiche del sistema solare e ciò fa supporre che i raggi cosmici siano prodotti in ambienti stellari.

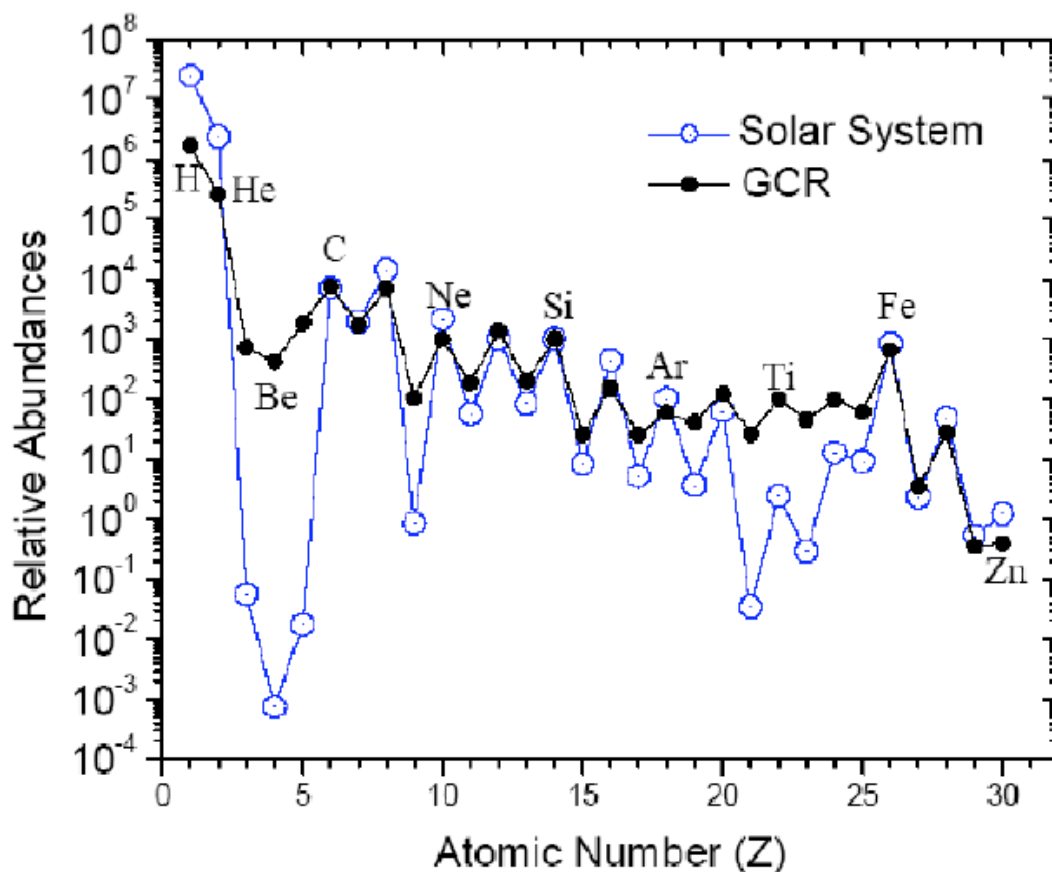
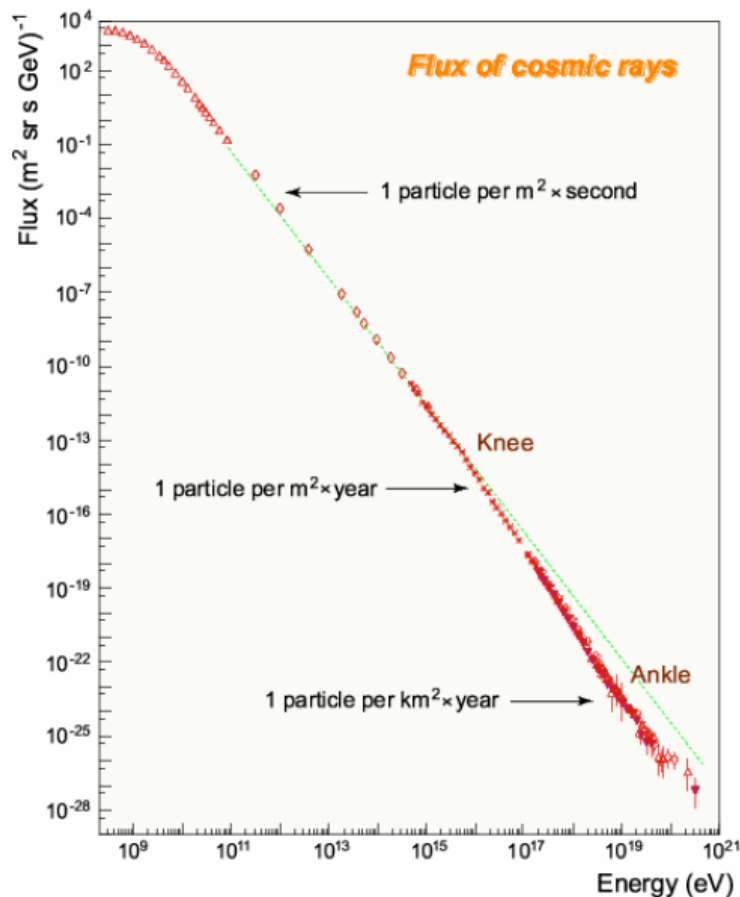


Figura 7.1 Abbondanze degli elementi dei cosmici

E' evidente comunque una sovrabbondanza (nella composizione dei raggi cosmici) di alcuni elementi che sono tipicamente consumati più facilmente nei processi nucleari all'interno delle stelle. Un primo gruppo di tali elementi è costituito da litio, berillio; H ed He sono presenti in quantità inferiori nei raggi cosmici. Lo sviluppo di rivelatori sensibili alla massa dei raggi cosmici ha reso possibile la determinazione delle componenti isotopiche per un certo numero di elementi, in particolare per H e He.

a terra. Alle altissime energie, l'analisi della composizione può essere fatta solo sulla base di misure indirette, ovvero per mezzo degli sciami prodotti in atmosfera dai raggi cosmici secondari. La composizione a queste energie è tuttora oggetto di dibattito.



6.4 Soluzioni proposte contro il rischio radiazioni per le missioni umane nello spazio

Per studiare i pericoli di queste radiazioni, nel 2003 la NASA ha creato lo Space Radiation Shielding Program. La prima proposta è stata quella di proteggere gli astronauti circondandoli di materia, emulando in qualche modo quindi la funzione dell'atmosfera terrestre. Una seconda proposta prevedeva di deviare i raggi cosmici con un campo magnetico, allo stesso modo in cui il campo magnetico terrestre protegge le regioni equatoriali e la Stazione Spaziale Internazionale. Un'idea più recente prevedeva di caricare positivamente le pareti del veicolo spaziale in modo da respingere gli ioni, anch'essi positivi. Nell'agosto del 2004 la NASA ha organizzato un incontro all'università

del Michigan per fare il punto della situazione, ma le conclusioni non sono state esattamente incoraggianti. Non si è riusciti, infatti, non solo a chiarire quale potesse essere la soluzione ai raggi cosmici, ma nemmeno se effettivamente vi sia una soluzione.

6.4.1 Scudo protettivo con interposizione di materiale

Per avere una protezione pari a quella dell'atmosfera terrestre, servirebbe un chilogrammo di materiale schermante per centimetro quadrato, anche se probabilmente 500 grammi basterebbero. Una quantità inferiore sarebbe invece controproducente, perché il materiale stesso produrrebbe una radiazione secondaria.

Se si adottasse l'acqua come materiale schermante, lo spessore dovrebbe essere di 5 metri. Un serbatoio sferico pieno d'acqua posto intorno ad una piccola capsula spaziale avrebbe quindi una massa di circa 500 tonnellate. Come termine di paragone, basti pensare che lo Shuttle è in grado di trasportare un carico di 30 tonnellate.

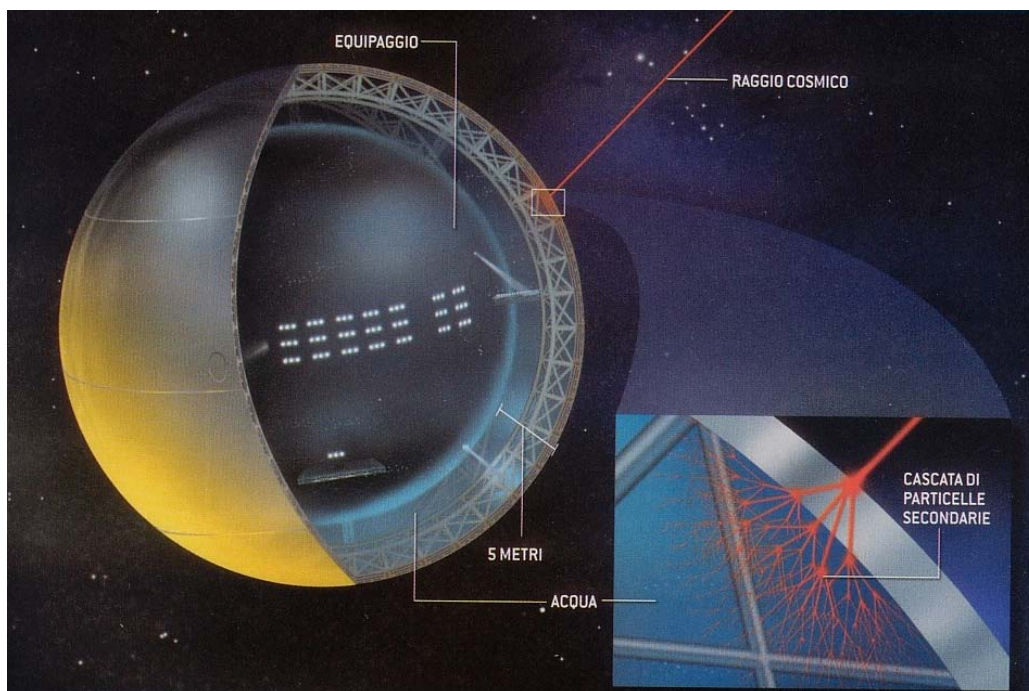


Figura 6.3 Scudo con interposizione di materiale

L'acqua sembrava una buona idea perché gli astronauti ne avrebbero avuto comunque bisogno e perché è ricca di idrogeno: gli elementi più pesanti, infatti, fornirebbero una schermatura più debole, poiché la presenza di protoni e neutroni nei loro nuclei ne limiterebbe la capacità di interagire con i raggi cosmici. Per aumentare il contenuto di idrogeno, si potrebbe usare l'etilene (C_2H_4), che ha l'ulteriore vantaggio di poter essere polimerizzato in polietilene. Questo, essendo solido, non avrebbe bisogno di un serbatoio per essere trasportato. Anche così, però, la massa complessiva sarebbe di 400 tonnellate: ancora troppe. L'idrogeno puro sarebbe più leggero, ma richiederebbe un'altissima pressione per essere contenuto in un volume ragionevole.

6.4.2 Scudo magnetico e schermo elettrostatico

La proposta successiva è stata una schermatura di tipo magnetico. Una particella elettricamente carica che si muove attraverso un campo magnetico subisce una deviazione della sua traiettoria. A seconda della disposizione delle linee di forza, la particella può essere riemessa in pressoché qualsiasi direzione o anche costretta a girare in tondo indefinitamente lungo un'orbita. Quando si avvicina al campo magnetico terrestre in prossimità dell'equatore, una particella carica può essere rimandata nello spazio, sempre che non abbia energia troppo elevata. Un veicolo spaziale potrebbe perciò trasportare un magnete per ottenere lo stesso risultato.

Un serio problema, tuttavia, è l'enorme energia cinetica dei protoni presenti nei raggi cosmici. Una protezione adeguata dovrebbe essere in grado di respingere protoni con energia inferiore ai due miliardi di elettronvolt (2GeV), che sono i più numerosi. Per fermarli nello spazio di pochi metri, erò, lo scudo dovrebbe produrre un campo magnetico dell'ordine dei 20 Tesla, circa 600000 volte il campo magnetico terrestre all'equatore. Un campo di questa intensità richiederebbe un elettromagnete costruito con cavi superconduttori simili a quelli usati negli acceleratori di particelle. Samuel C.C. Ting, del Massachusetts Institute of Technology, è riuscito a progettare un sistema di questo tipo con una massa di solo nove tonnellate: un grosso progresso rispetto agli scudi

solidi o liquidi, ma ancora troppo pesante per poter effettuare un viaggio fino a Marte, in cui vanno previsti anche l'atterraggio e il decollo per il ritorno.

L'ipotesi magnetica presenta però alcuni punti che vale la pena di considerare. Un campo magnetico non fornisce una schermatura apprezzabile vicino ai poli magnetici, dove le particelle arrivano parallelamente al campo invece che trasversalmente. E' per questo motivo che il campo terrestre offre protezione solo alle popolazioni delle regioni equatoriali. Per mantenere gli astronauti nell'equivalente di una regione equatoriale, la navicella dovrebbe avere la forma di una ciambella. L'equipaggio sarebbe però soggetto a un campo magnetico di 20 Tesla, e gli effetti biologici di una simile esposizione non sono noti. John Marshall, un fisico dell'Università di Chicago afferma che quando infilava la testa all'interno del campo da 0,5 Tesla prodotto dal magnete di un vecchio acceleratore di particelle, ogni movimento causava piccoli lampi di luce negli occhi e un sapore acido in bocca, probabilmente a causa dell'elettrolisi della saliva.

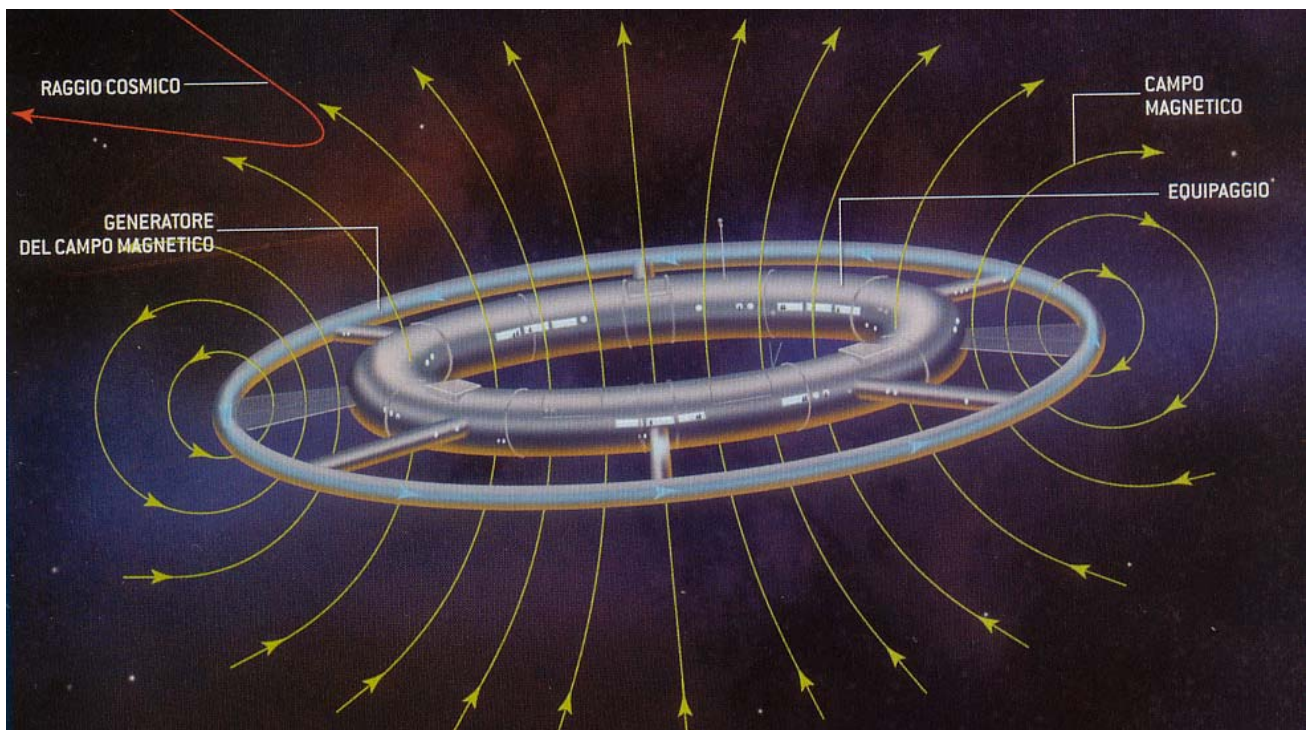


Figura 6.4 Scudo realizzato con un campo magnetico

Se un campo magnetico di 0,5 Tesla ha effetti simili sui processi chimici del corpo umano, è chiaro che servono ulteriori ricerche per verificare la sicurezza di uno scudo da 20 Tesla. Se si rivelasse pericoloso bisognerebbe neutralizzare il campo principale nell'abitacolo utilizzando un elettromagnete secondario, il che renderebbe però l'intero sistema più complicato e pesante.

Alcuni ricercatori hanno proposto un campo magnetico che si estenda per una distanza ben superiore a pochi metri. Il campo verrebbe allargato utilizzando un plasma, allo stesso modo in cui il gas ionizzato del vento solare trasporta il campo magnetico del Sole fino a regioni lontane. Un campo "gonfiato" di questo tipo non avrebbe bisogno di essere molto intenso: un Tesla o anche meno sarebbe sufficiente. Sfortunatamente, questa idea non tiene conto del fatto che i plasmi sono notevolmente instabili. I tentativi degli ultimi decenni per confinare un plasma in un campo magnetico allo scopo di ottenere energia dalla fusione nucleare hanno dimostrato le enormi difficoltà che si incontrano provando a controllare questo stato della materia. Inoltre, anche se si riuscisse a confinare il plasma per gonfiare il campo magnetico, esso servirebbe più ad indebolirlo che a rafforzarlo: le linee di forza verrebbero infatti spinte verso l'esterno in maniera radiale, distribuendosi intorno a circonferenze più ampie, diminuendo così la densità di energia associata al campo magnetico.

Un'ulteriore proposta è stata quella di dotare il veicolo spaziale di carica elettrica. Se le pareti esterne avessero una tensione di due miliardi di volt rispetto allo spazio circostante, sarebbero in grado di respingere tutti i protoni cosmici con energie fino a due miliardi di elettronvolt. Un'idea simile è stata avanzata anche per la schermatura di una base lunare. Questa proposta non sembra però tenere conto del fatto che lo spazio non è vuoto. Nelle vicinanze della terra, a causa del vento solare, ci sono circa cinque ioni e cinque elettroni per centimetro cubo. Questi elettroni, dotati di carica negativa, sarebbero fortemente attratti da una navicella carica positivamente. Poiché il campo elettrico si estenderebbe fino al punto in cui la sua energia potenziale diventa minore dell'energia termica degli elettroni interplanetari (un raggio di decine di migliaia di chilometri intorno al veicolo), esso attirerebbe tutti gli elettroni presenti in un volume di spazio immenso.

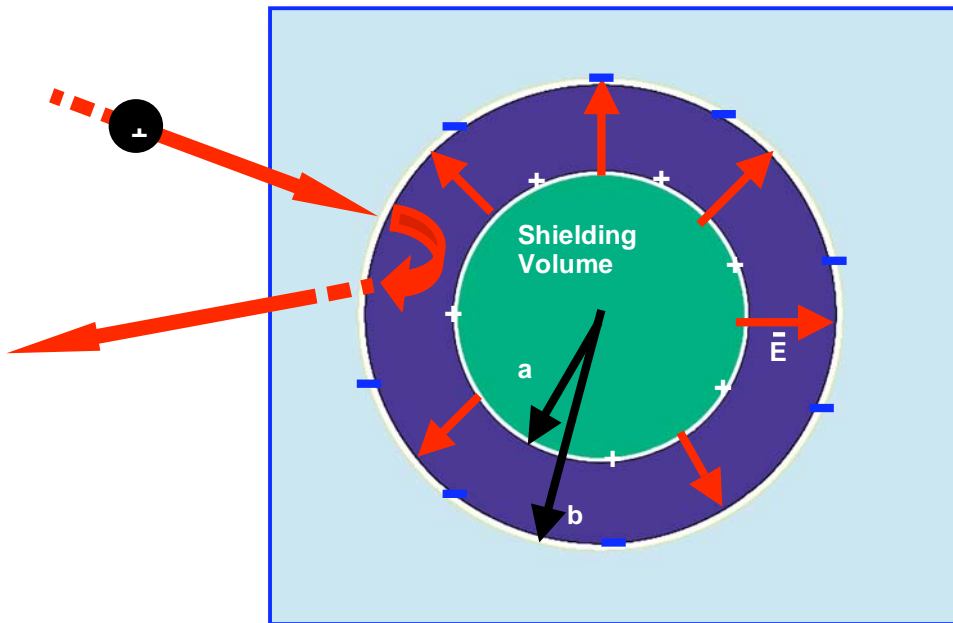


Figura 6.4 Schema di funzionamento dello schermo elettrostatico

Questi colpirebbero le pareti con un'energia di due miliardi di elettronvolt e avrebbero lo stesso effetto dei raggi cosmici, poiché ogni elettrone ha la stessa energia dei protoni respinti dallo scudo. Il flusso naturale di raggi cosmici sarebbe perciò sostituito da un flusso artificiale ancora più intenso, perché nell'impatto con la navicella gli elettroni produrrebbero un bombardamento di raggi gamma ancora più pericoloso di quello originario.

Inoltre, le stime sulla potenza necessaria per mantenere il veicolo elettricamente carico sono sconcertanti: una corrente di un ampere a due miliardi di volt corrisponde secondo la ben nota relazione:

$$P = VI^2$$

Equivale a 2000 megawatt, la produzione di una centrale elettrica di discrete dimensioni, e si è calcolato che la corrente necessaria supererebbe i dieci milioni di ampere. I sostenitori di questa opzione non hanno ancora spiegato come pensano di caricare un veicolo spaziale a due miliardi di volt.

Ci sono state anche proposte più semplici. Razzi più grandi o propulsori più potenti potrebbero abbreviare il viaggio e abbassare il tempo di esposizione degli astronauti, ma ciò significherebbe un considerevole aumento del carburante e quindi dei costi.

Una volta su Marte poi il problema non scomparirebbe: l'atmosfera è minima, appena dieci grammi per centimetro quadrato. Interrare una base sotto centinaia di tonnellate di terreno ne aumenterebbe la sicurezza, ma richiederebbe macchinari pesanti.

Attualmente quindi, le proposte per proteggere gli astronauti dai raggi cosmici non lasciano spazio all'ottimismo. D'altra parte lo studio degli aspetti biomedici del problema è appena iniziato. Nel 2003 la NASA ha creato il National Space Radiation Laboratory, con lo scopo di determinare i meccanismi alla base del danno cellulare ed eventualmente trovare un farmaco in grado di ridurlo. Il laboratorio sta studiando gli effetti delle radiazioni sul DNA e i problemi più difficili da curare. Le uniche sostanze finora sperimentate che abbiano dimostrato di migliorare la resistenza alle radiazioni sono a loro volta tossiche.

I processi di guarigione naturale della cellula potrebbero contrastare dosi di radiazioni diluite nel tempo e alcuni soggetti potrebbero avere una resistenza maggiore. Se così fosse, le attuali stime di incidenza del cancro, basate su emissioni di radiazioni brevi e intense, potrebbero rivelarsi troppo pessimistiche.

6.4.3 Metodi di misura della dose assorbita

I vincoli imposti alla strumentazione per la misura della dose di radiazione assorbita a bordo di veicoli spaziali abitati sono molto più stringenti di quelli applicati ad analoghe apparecchiature

basate a terra o installate a bordo di sonde o satelliti. Questi vincoli sono fondamentalmente di tre tipi:

- Sicurezza dell'equipaggio (vincoli per sistemi alimentati ad alta tensione, costituiti da polimeri a rischio outgassing, oppure con parti in vetro)
- Vincoli legati a fattori economici, che dato l'elevato costo delle missioni richiedono strumentazione semplice e di basso peso. Il sistema deve inoltre essere altamente affidabile, deve avere una versatilità d'uso elevata e tale da supportare carichi di lavoro intensi riducendo al massimo la necessità di interventi manutentivi e di riparazione. Tutto ciò si riassume in quello che in termini ingegneristici si definisce un progetto "robusto".

Nello spazio c'è sempre più richiesta di energia elettrica che può essere fornita sia da pannelli solari ma che deve comunque essere ottimizzata. Ciò comporta la necessità di detector che richiedano il minor quantitativo possibile di energia. Tale richiesta favorisce quindi la scelta di detector passivi e in qualche circostanza di detector alimentati da batterie.

-Sensibilità dello strumento dipendente dal rate di radiazione aspettata. Si desidera un sistema con un buon grado di risoluzione nella misura della carica e del tempo. Questo è cruciale nel caso dei neutroni perché è spesso difficile discriminare tra particelle cariche e flussi di neutroni.

Ovviamente nessun detector soddisfa contemporaneamente i tre succitati vincoli. Per tale motivo si tende ad installare differenti tipi di detectors in maniera tale da aver un quadro completo dell'ambiente soggetto a radiazione.

6.5 Un monitor ad RPC

L'utilizzo di un telescopio ad RPC consente di disporre di un detector in grado di fornire un check real time del rate di cosmici incidenti sullo spacecraft durante i viaggi interplanetari e nelle colonie

abitate. Come già precedentemente detto nessun detector è in grado di soddisfare tutti i vincoli precedentemente citati che riguardano la strumentazione da imbarcare a bordo. Non fanno eccezione gli RPC (Resistive Plate Chambers) i cui aspetti negativi si possono riassumere in tre fondamentali:

- sistema funzionante con flusso di miscela gassosa (che può prevedere gas infiammabili come l'isobutano e recipienti in pressione per il funzionamento dell'apparato)
- elevata potenza elettrica richiesta (il sistema funziona sul principio di un condensatore e alle sue armature è applicata una tensione dell'ordine delle migliaia di Volts).

Al tempo stesso però, tale tipologia di detector è in grado di fornire una risposta temporale elevata in virtù del basso tempo morto^{*****} ed è inoltre impiegabile all'interno di campi magnetici anche intensi senza perdere il suo potere risolutivo (cosa che non può essere fatta ad esempio con i comuni scintillatori). Quest'ultima caratteristica suscita un certo interesse alla sua utilizzazione in accoppiamento ad uno scudo magnetico come sistema di controllo e prevenzione di failures.

Un RPC non è però in grado di discriminare particelle neutre in quanto sostanzialmente esse non sono in grado di ionizzare il gas; infatti a i neutroni, ad esempio, non interagiscono in maniera elettromagnetica e quindi non possono estrarre elettroni dalle molecole del gas per produrre un segnale

Tuttavia le radiazioni gamma (che sono neutre e quindi attraversano indisturbate il campo magnetico protettivo della nave spaziale) possono ionizzare il gas.

In tal caso situazione gli RPC darebbero un segnale che difficilmente può essere identificato come causato da radiazione neutra piuttosto che da particelle cariche. In questo caso si potrebbe generare una situazione di ambiguità per cui non si potrebbe sapere se tale segnale è dovuto ad una failure nel campo magnetico protettivo (per sistemi che prevedano questo tipo di protezione) che ha

***** Si definisce tempo morto, l'intervallo in cui il rivelatore resta "insensibile". Se cioè un secondo "evento" non dista temporalmente dal primo per più di detto tempo morto, esso non viene registrato.

lasciato passare particelle cariche, oppure all'interazione con radiazione neutra. Per risolvere il problema è sufficiente installare un seconda gap nell' RPC e quindi utilizzare una double-gap , come quelle viste per CMS. Connettendo le due in logica AND, se anche la seconda fornisce segnale, si sarebbe in presenza di una coincidenza e quindi nella evidenza del passaggio di una particella carica non schermata.

Nel caso i cui invece non si avesse coincidenza, e questo è statisticamente molto probabile per la radiazione neutra, la logica taglierebbe il segnale che può quindi essere imputato a radiazione neutra e quindi insensibile al campo magnetico.

Appendice

Tabelle delle correnti monitorate alla ISR