

I CAPITOLO

APPARATO CMS

In questo primo capitolo viene descritto l'apparato CMS, acronimo di Compact Muon Solenoid, ad LHC (Large Hadron Collider) in modo abbastanza generale per poter visualizzare lo sfondo nel quale questo lavoro di tesi si inserisce.

In particolare verrà dedicato un sottocapitolo a quella parte di CMS dedicata alla rivelazione ed identificazione dei μ^1 che più ci interessa.

I.1 L'ACCELERATORE LHC

Tutte le evidenze indicano che la nuova fisica e le risposte ad alcuni dei principali problemi di oggi sono ad energie attorno al TeV: l'acceleratore LHC al CERN è lo strumento progettato per questi obiettivi. Il nuovo acceleratore utilizzerà il tunnel di 27 Km del LEP, le sorgenti e i preacceleratori già esistenti.

Nella Tabella I.1 sono riportati i dati principali di alcuni dei principali collider oggi esistenti in modo da fornire degli utili parametri di confronto.

Tabella I.1

Acceleratore	Fasci	Energia fasci (GeV)	E_{cm} (GeV)	Luminosità ($cm^{-2}s^{-1}$)
ISR (CERN)²	p-p	31+31	62	10^{32}
HERA (DESY, Amburgo)	p-e	820+30	314	$1.5 \cdot 10^{31}$
LEP (CERN)	e^+e^-	50+50	100	10^{31}
LEP II (CERN)	e^+e^-	90+90	180	-
SLC (Stanford)	e^+e^-	50+50	100	$6 \cdot 10^{30}$
SPS (CERN)	p-p	270+270	540	10^{30}

¹ La particella μ è un leptone con massa $0.1057 \text{ GeV}/c^2$ (circa 2000 volte la massa di un elettrone) e vita media di $2.20 \mu s$.

² Non esiste più, è riportato per ragioni storiche: si tratta del primo collider costruito.

I.1.1 Caratteristiche principali

L'acceleratore LHC è un collider p-p che utilizza i più avanzati magneti superconduttori e tecnologie finora mai utilizzate: il progetto iniziale risale al 1984 mentre l'approvazione da parte del CERN Council è del dicembre 1994; nella Tabella I.2 ne sono riassunti i parametri principali.

Tabella I.2

Parametro	Valore	Unità
Energy	7	TeV
Dipole field	8.4	T
Coil aperture	56	mm
Distance between apertures	194	mm
Luminosity	10^{34}	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam-beam parameter	0.0034	
Injection energy	450	GeV
Circulating current/beam	0.54	A
Bunch spacing	25	ns
Particles per bunch	10^{11}	
Stored beam energy	334	MJ
Normalized transverse emittance	3.75	$\mu\text{m rad}$
r.m.s. bunch length	0.075	m
β values at I.P. in collision	0.5	m
Full crossing angle	200	μrad
Beam lifetime	22	h
Luminosity lifetime	10	h
Energy loss per turn	6.7	KeV
Critical photon energy	44.1	eV
Total radiated power per beam	3.6	KW

Si tratta di un acceleratore estremamente versatile nel quale circolano fasci di protoni con energie di $7 + 7$ TeV e con punti di incrocio dei fasci di elevata luminosità ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) permettendo così alti rate di interazione negli esperimenti. LHC permetterà di ricreare le condizioni dell'universo appena 10^{-12} s dopo il Bing-Bang quando la temperatura era di 10^{16} gradi.

Oltre ai protoni possono collidere ioni pesanti, come il piombo, con luminosità prevista di $10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ed energia totale di collisione superiore a 1.25 TeV, 30 volte più

grande che nel RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) in costruzione a Brookhaven (U.S.).

Facendo operare assieme LHC e LEP sarà possibile ottenere collisioni e-p con luminosità di $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ed energia fino a 1.5 TeV, 5 volte superiore di quella ottenibile attualmente con HERA (vedi tabella precedente).

I.1.2 Struttura di LHC

Nella Figura I.1 è riportata schematicamente la struttura dell'acceleratore. Sono evidenziati i punti predisposti per gli esperimenti.

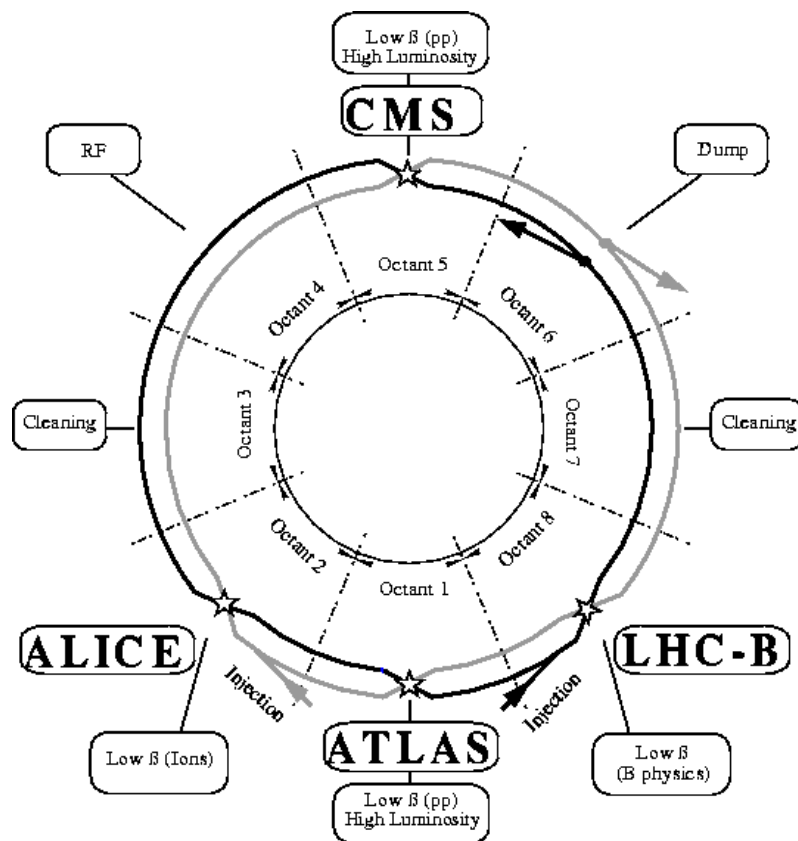


Figura I.1: struttura di LHC nella quale sono evidenziate le parti principali e la disposizione degli esperimenti previsti.

LHC consiste di due sincrotroni “colliding”, installati nel tunnel di 27 Km del LEP, riempiti da protoni derivati da SPS; due canali di magneti superconduttori provvedono ad accelerarli e mantenerli in circolazione per varie ore: quando i fasci sono degenerati la macchina viene svuotata e di nuovo riempita per un altro ciclo di utilizzo.

La struttura della macchina rispecchia quella del LEP, con 8 sezioni diritte per gli esperimenti o altro utilizzo, ciascuna di 528 m. Le due inserzioni ad alta luminosità sono poste su sezioni diametralmente opposte: sezione 1 (ATLAS) e 5 (CMS). Altre due sezioni per gli esperimenti sono nei punti 2 (ALICE Pb ions) e 8 (fisica B), queste

due ultime sezioni contengono anche i sistemi di iniezione. Le quattro sezioni illustrate finora sono le uniche nelle quali i fasci si incrociano.

Le sezioni 3 e 7 contengono dei collimatori con magneti classici, la 4 il sistema RF; in quest'ultima sezione si potrà eventualmente ricavare dello spazio per un altro esperimento. La sezione 6, infine, contiene il sistema di estrazione dei fasci.

Vediamo brevemente le parti principali di LHC.

1.1.2.1 Sistema di iniezione

Il sistema di iniezione utilizza la catena, già esistente, Linac-Booster-PS-SPS con alcune modifiche per adattarli alle caratteristiche richieste da LHC.

L'iniezione dei fasci nell'LHC è fatta a 450 GeV alternativamente nei due anelli. Una volta completato il processo i fasci vengono accelerati all'energia di collisione in circa 20 minuti.

1.1.2.2 Magneti

Per risparmiare spazio e costo (circa un 25%) i due anelli utilizzano per i magneti (sono 1296) gli stessi avvolgimenti e lo stesso criostato.

L'alta energia raggiunta dai fasci necessita, per il contenimento, di dipoli superconduttori capaci di produrre un campo magnetico di 8.36 T, raggiungibile solo operando a bassissima temperatura. Oltre ai dipoli per guidare e incrociare i fasci di protoni servono più di 2500 altri magneti sia convenzionali (magnet per il contenimento) che superconduttori (quadropoli focalizzanti).

1.1.2.3 Raffreddamento

Viene utilizzato elio superfluido che possiede straordinarie proprietà di conduzione del calore, permettendo di trasportare 1 KW di refrigerazione per più di un Km con una caduta di temperatura di meno di 0.1 K. I magneti superconduttori sono posti in un bagno di elio a 1.9 K a pressione atmosferica raffreddato da elio a bassa pressione che fluisce in tubi scambiatori di calore. Alcuni numeri:

- 40000 giunzioni a tenuta stagna;
- 12 milioni di litri di azoto liquido verranno vaporizzati al primo raffreddamento delle 31000 tonnellate di materiale;
- 700000 litri di elio.

1.1.2.4 Esperimenti

Sono previsti attualmente i seguenti esperimenti:

- CMS;
- ATLAS, A Toroidal LHC ApparatuS;
- ALICE, A Large Ion Collider Experiment;
- LHC-b, studio della violazione CP attraverso il decadimento dei mesoni B.

I.2 ESPERIMENTO CMS³

L'idea di un rivelatore compatto per LHC basato su un solenoide viene presentata alla fine del 1990 all'LHC workshop di Aachen. Studiata la fattibilità del solenoide (con la proposta di un progetto basato su 4 strati metallici rinforzanti) una prima intesa di collaborazione viene firmata nel maggio 1991. Nel marzo 1992 viene presentata la struttura completa del rivelatore inclusi calorimetria e tracking: dato il raggio del magnete il calorimetro poteva essere completamente contenuto all'interno della bobina con il vantaggio di non degradarne la risoluzione.

I punti qualificanti CMS vengono fissati come segue:

1. un ottimo e ridondante sistema muonico;
2. il miglior calorimetro elettromagnetico possibile compatibilmente con il punto 1;
3. un rivelatore centrale di alta qualità;
4. un rivelatore finanziariamente fattibile.

Nella *Letter of Intent* dell'ottobre 1992^[C2] viene proposto il sistema di rivelazione dei μ consistente in quattro stazioni con la possibilità di tre misure indipendenti del momento: nel tracker, dopo la bobina e nel ferro del ritorno di flusso del magnete.

Si presume che il rivelatore sarà pronto alla fine del 2002: il LEP II si fermerà alla fine del 1999 permettendo il completamento della caverna e l'installazione del rivelatore. In questo scenario la prima collisione sarà osservata in CMS nel 2003.

I.2.1 La fisica a CMS

Il rivelatore CMS è stato progettato per identificare e misurare con precisione muoni, fotoni ed elettroni in un grande range energetico e ad alta luminosità ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$), sfruttando allo stesso modo la più bassa luminosità prevista per il primo periodo di funzionamento di LHC.

A luminosità inferiore di $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ si avrà una vasta produzione di quarks t e b che permetterà lo studio del top e della violazione CP attraverso le oscillazioni dei mesoni B^0 .

Il rivelatore CMS è comunque ottimizzato per la ricerca del bosone di Higgs H^0 in un intervallo di massa compreso tra 90 GeV e 1 TeV.

Oltre che come collider p-p LHC sarà usato con ioni pesanti con un'energia nel centro di massa di 5.5 TeV per coppia di nuclei. La formazione del *quark-gluon plasma* (si tratta di un nuovo tipo di materia adronica deconfinata) in queste collisioni è segnalata dalla forte soppressione della produzione dei mesoni vettori Y' e Y'' , relativamente alla produzione di Y nelle collisioni p-p: la misura dei muoni a basso momento prodotti nelle collisioni ioniche servirà per ricostruire i mesoni Y , Y' , e Y'' prodotti.

³ I dati relativi a CMS sono tratti dal *Technical Proposal* più recente (dicembre '94)^[C1].

I.2.2 Struttura del rivelatore

Come si è detto CMS è stato progettato per ottenere una precisa identificazione e misura di muoni, elettroni e fotoni ovvero, sinteticamente:

- avere un sistema di identificazione e misura dei muoni molto buono e nello stesso tempo compatto (ciò ha portato alla scelta del magnete solenoidale capace di un campo di 4 T e ad un sistema di rivelazione ridondante);
- avere un calorimetro elettromagnetico con la migliore risoluzione possibile compatibilmente con lo spazio offerto dal magnete;
- avere un rivelatore centrale in grado di ricostruire le tracce di elettroni e muoni con grande momento trasverso (dato il grande campo magnetico) ed alle alte luminosità previste.

Nelle pagine seguenti sono riportate alcune figure che mostrano varie viste di CMS: l'asse X è orizzontale e punta dal centro di interazione verso il centro di LHC, l'asse Y è perpendicolare all'asse X e alla direzione del fascio e punta verso l'alto, l'asse Z infine è allineato alla direzione del fascio e al campo magnetico di CMS.

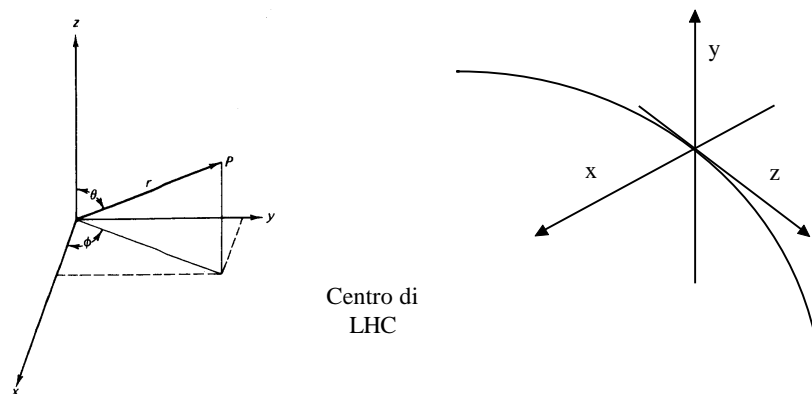


Figura I.2: sistema di riferimento cartesiano e polare per CMS.

Con riferimento alle figure si può notare come l'apparato sia costituito da una sezione centrale (*barrel*) e da due tappi (*endcap*) che chiudono il barrel.

Il barrel, procedendo dall'interno verso l'esterno, è costituito da un rivelatore centrale per la ricostruzione delle tracce (*inner tracker*), da un calorimetro elettromagnetico (*ECAL*), da un calorimetro adronico (*HCAL*), dalla bobina del magnete superconduttore (*superconducting coil*) e infine dagli anelli di ritorno del magnete (*return yoke*) con al loro interno le stazioni di misura dei muoni (*muon chamber*).

Gli endcap sono costituiti unicamente dagli anelli di ritorno del magnete e dalle stazioni dei muoni.

Sull'asse del fascio, esterni agli endcaps, trovano posto altri due calorimetri adronici (*very forward calorimeter*).

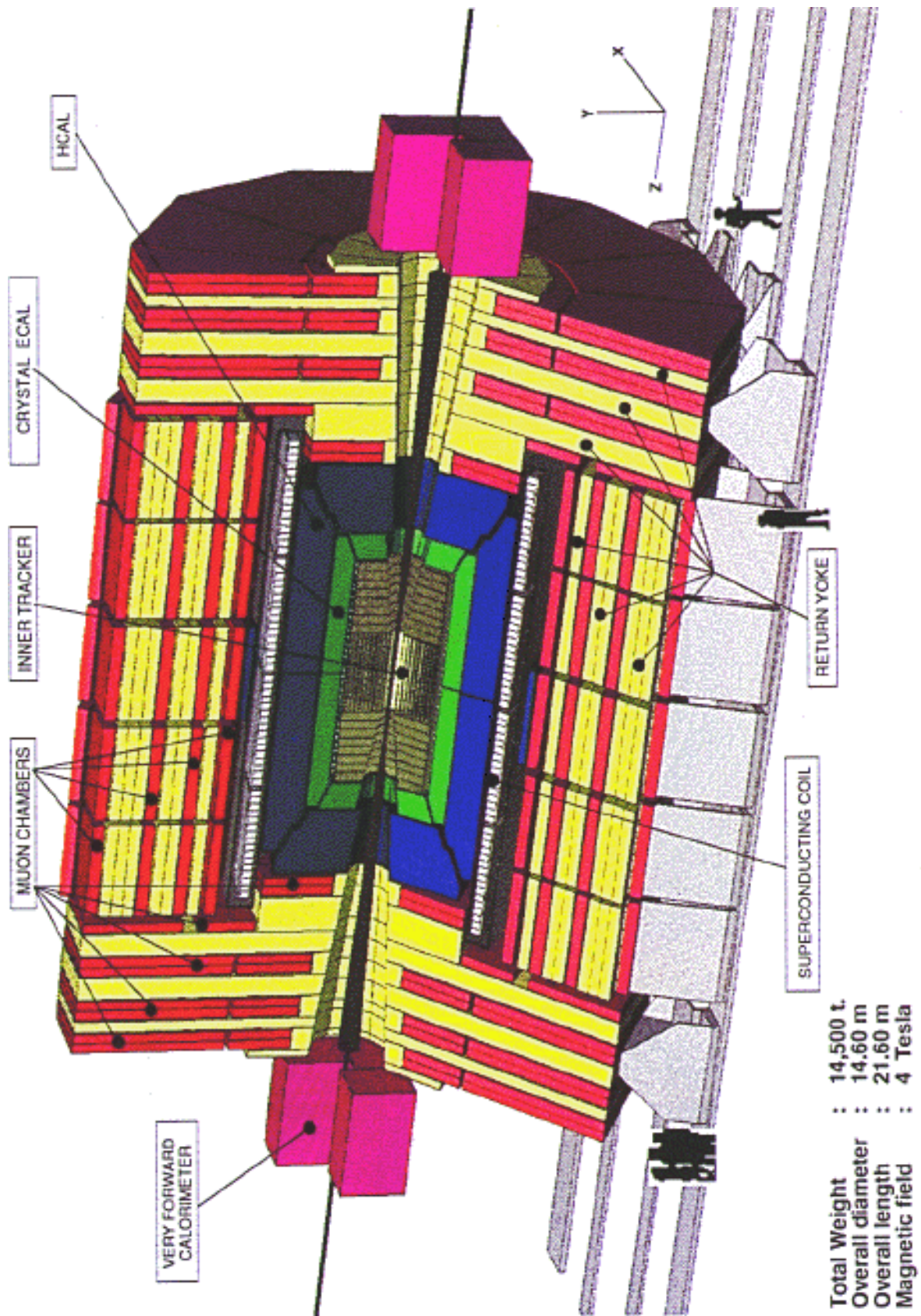


Figura I.3: vista tridimensionale di CMS.

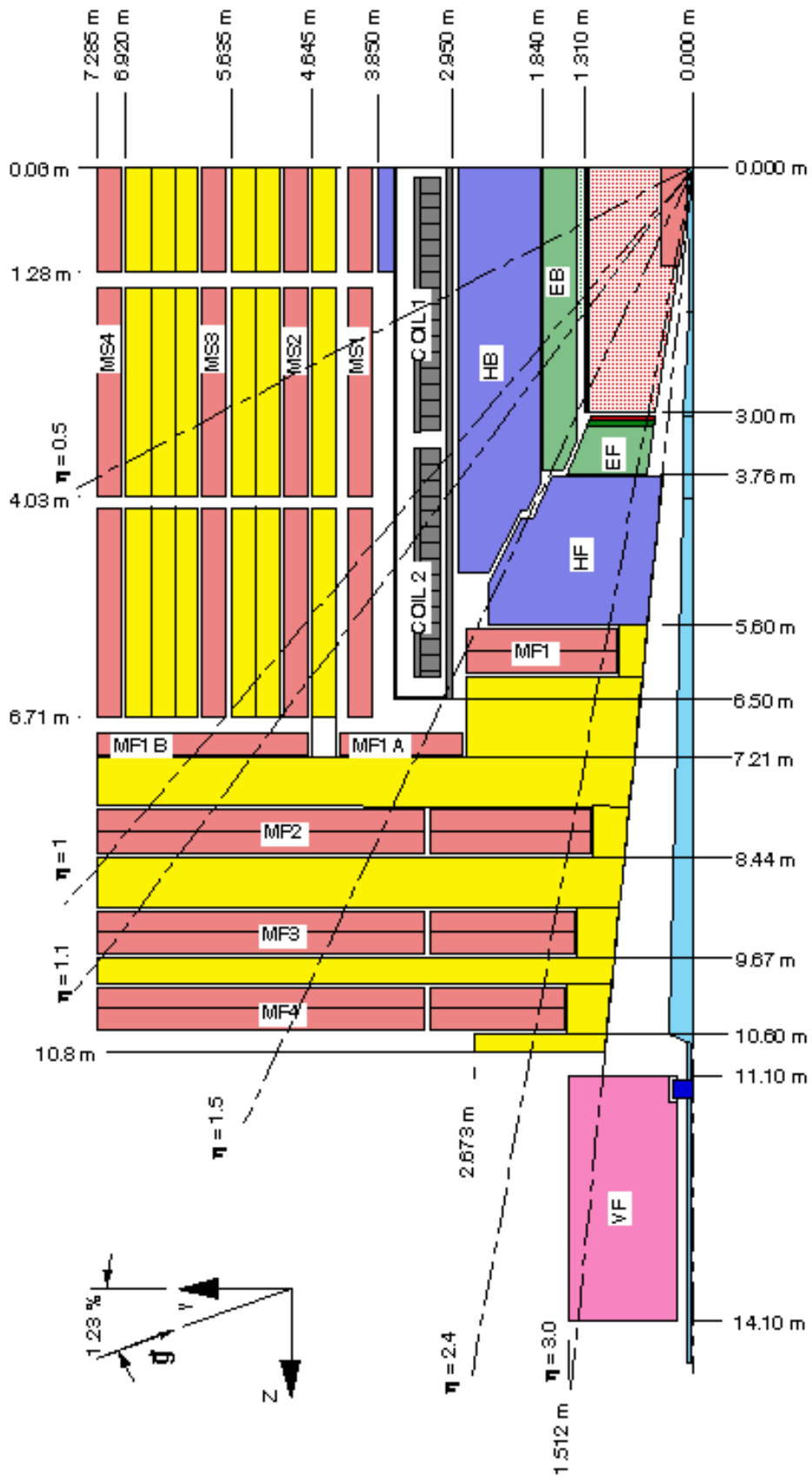


Figura I.4: vista in sezione longitudinale di CMS.

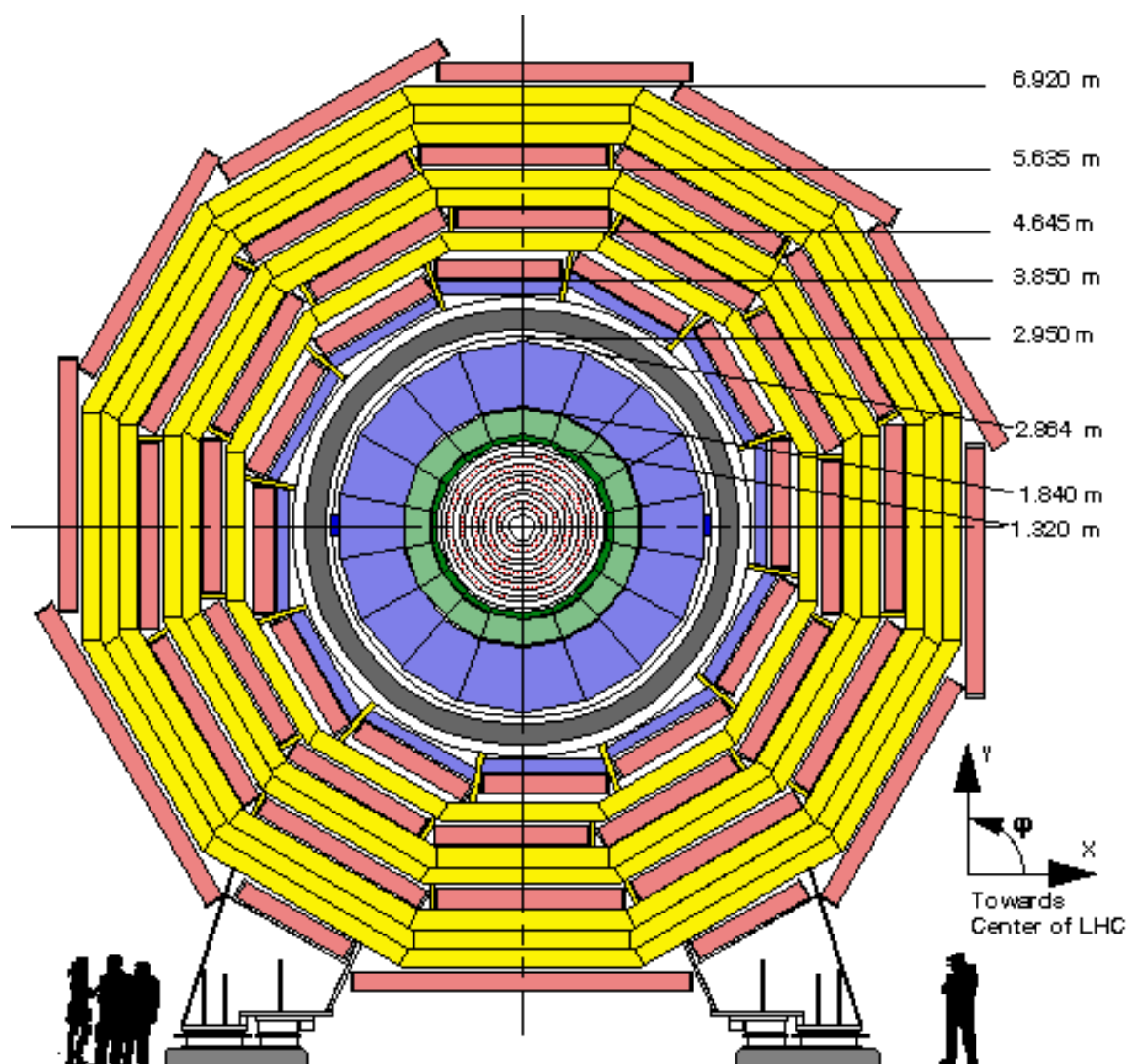


Figura I.5: vista in sezione trasversale di CMS.

La struttura nel suo complesso è imponente: 14.6 m di diametro, 21.6 m (esclusi i due calorimetri più esterni) di lunghezza e un peso di 14500 tonnellate. Il costo previsto è di 459 milioni di franchi svizzeri.

Nel seguito descriviamo brevemente la varie parti del rivelatore; il prossimo sottocapitolo sarà dedicato al sistema di rivelazione dei muoni; nella Tabella I.3 riassumiamo per semplicità le convenzioni per i nomi dei vari sotto-rivelatori di CMS.

Tabella I.3

TRACKER (rivelatore centrale)	TB	tracker barrel detector
	TF	tracker forward (endcap) detector
ECAL (calorimetro E.M.)	EB	ECAL barrel detector
	EF	ECAL forward (endcap) detector
	SB	preshower in front of TB
	SF	preshower in front of EF
HCAL (calorimetro adronico)	HB	HCAL barrel detector
	HF	HCAL forward (endcap) detector
	VF	very forward calorimeter
MUON (rivelatore di muoni)	MS	barrel muon station
	MF	forward muon station

1.2.2.1 Magnete

La scelta del magnete costituì il punto di partenza di CMS; l'esigenza di una buona rivelazione dei μ senza imporre condizioni troppo restrittive al sistema di rivelazione portò alla scelta della struttura solenoidale:

- con le linee del campo parallele al fascio, la deviazione dei μ avviene in un piano perpendicolare consentendo, grazie alle piccole dimensioni dei fasci, una determinazione del vertice con una risoluzione di 20 μm ;
- è quella che garantisce il minor ingombro;
- si ha già una vasta esperienza nella costruzione di questo tipo di magneti (ALEPH, DELPHI).

Si tratta di un solenoide superconduttore di 13 m di lunghezza, diametro interno di 5.9 m capace di un campo di 4 T. Il ritorno di flusso è assicurato da anelli in ferro spessi in totale 1.8 m (si tratta di tre strati, rispettivamente dal più interno, 0.3 m, 0.6 m, 0.9 m) contenenti al loro interno le stazioni di misura dei μ .

L'utilizzo del solenoide permette l'efficiente rivelazione e misura dei μ fino ad un'inclinazione η di 2.4 radianti e allo stesso tempo il diametro della bobina consente l'alloggiamento di rivelatore centrale e calorimetri.

L'insieme degli anelli di ritorno, come si nota dalla Figura I.6 nella pagina che segue, si configura come una struttura a 12 lati composta da 5 anelli centrali di 2.6 m ciascuno (che costituiscono il barrel) e 3 dischi a ciascuna estremità (endcap).

L'anello centrale⁴ sopporta la bobina del solenoide mentre gli altri quattro possono scorrere su binari paralleli per consentire l'accesso alle stazioni di μ ; allo stesso modo possono essere separati i dischi terminali.

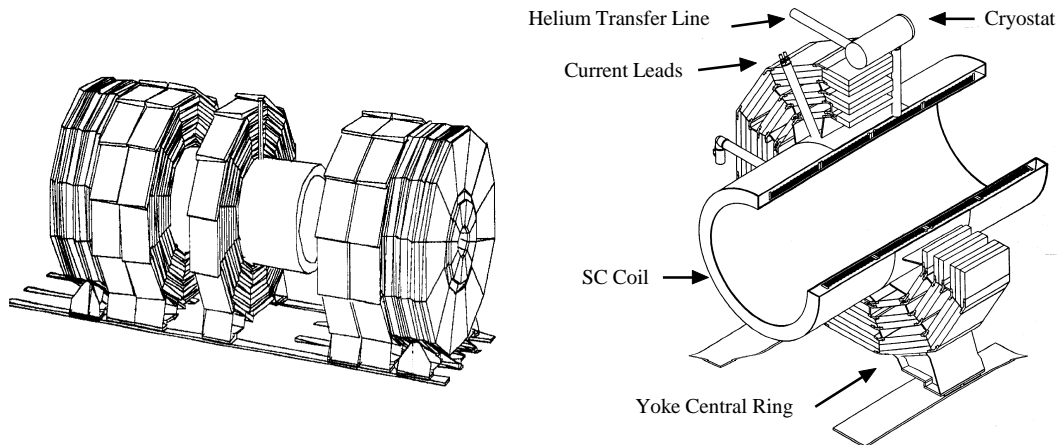


Figura I.6: vista del magnete con anelli di ritorno e particolare dell'anello centrale con la bobina del solenoide.

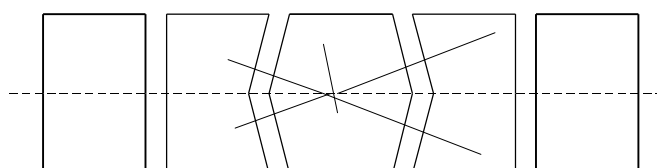
La struttura ha una lunghezza di 21.6 m, un diametro esterno di 14.6 m e il ferro ha una massa di 11500 tonnellate. Dato che il magnete è l'elemento principale di CMS per peso, grandezza e robustezza viene utilizzato come struttura di supporto per tutti i componenti del barrel.

1.2.2.2 Rivelatore centrale (inner tracker)

Il rivelatore centrale gioca un ruolo importante in ogni ricerca fisica: è un vero e proprio sotto-rivelatore. L'obiettivo è quello di ricostruire le tracce singole con grande momento trasverso con un'efficienza superiore al 95% mentre per quelle nei jets del 90%, in un range $|\eta| < 2.6$. La risoluzione spaziale è di 20 μm nella direzione trasversa e di 100 μm lungo l'asse Z.

Il rivelatore centrale è costituito da tre tipi di rivelatori in grado di assicurare precisione nella misura del momento ed efficiente ricostruzione delle tracce anche alla luminosità più elevata: rivelatori a pixel di silicio a più strati nella parte più interna

⁴ È attualmente in progetto la modifica dell'anello centrale e dei due adiacenti per diminuire la perdita di efficienza nella zona di contatto degli anelli, sostituendo alla sezione rettangolare quella triangolare:



(due nel barrel e tre negli endcaps), microstrip con passo di 50 μm nella parte intermedia e MSGC (MicroStrip Gas Chambers) nella zona più esterna.

Il rivelatore centrale è una delle parti più delicate dell'intero apparato poiché deve sostenere stabilmente nel tempo e con precisione spaziale i rivelatori entro 10 μm (altrimenti ne viene degradata la risoluzione intrinseca) ma deve anche essere costituito dalla minore quantità di materiale possibile per evitare interazioni secondarie.

1.2.2.3 Calorimetria

Due calorimetri, uno adronico (HCAL) e uno elettromagnetico (ECAL), sono collocati tra il rivelatore centrale e il magnete come si vede nella Figura I.7, un terzo è collocato alle due estremità del rivelatore dopo gli endcaps (VF).

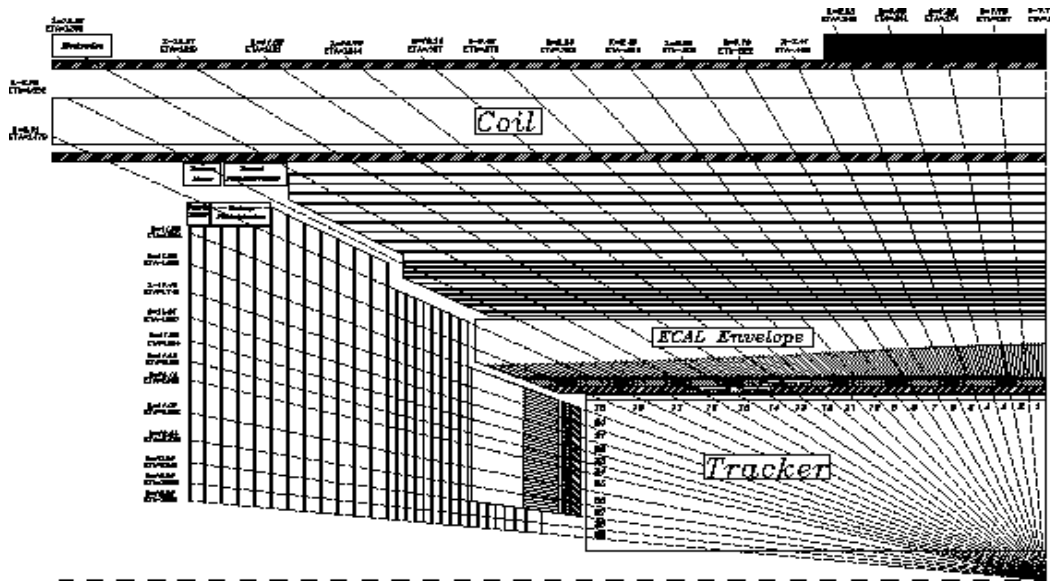


Figura I.7: vista longitudinale dei due calorimetri ECAL ed HCAL.

Il processo fisico che impone i requisiti più restrittivi al calorimetro elettromagnetico è il decadimento del bosone di Higgs in due fotoni:

$$H^0 \rightarrow 2g$$

Dato che la larghezza del decadimento è molto stretta, la risoluzione nella misura della massa del bosone (somma dell'energia dei due fotoni poiché siamo nel centro di massa) è interamente dovuta al calorimetro:

$$\frac{\mathbf{s}_M}{M} = \frac{1}{2} \left[\frac{\mathbf{s}_{E_1}}{E_1} \oplus \frac{\mathbf{s}_{E_2}}{E_2} \oplus \frac{\mathbf{s}_J}{\tan(J/2)} \right]$$

dove il simbolo \oplus significa somma quadratica, l'energia è in GeV e l'angolo tra i fotoni in radianti.

La risoluzione energetica di un calorimetro si scrive:

$$\frac{\mathbf{s}_E}{E} = \left[\frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{\mathbf{s}_N}{E} \right]$$

dove a è il termine stocastico, b il costante e \mathbf{s}_N l'equivalente in energia del rumore.

In un calorimetro samplig è difficile che il termine stocastico sia inferiore al $10\%/\sqrt{E}$, la scelta fatta di utilizzare un calorimetro omogeneo (cristalli di PbWO_4) permette di abbassare il termine stocastico al $2\%/\sqrt{E}$ e di richiedere che il termine costante sia sotto lo 0.5%.

Nel decadimento del bosone di Higgs in due fotoni può diventare importante il valore dell'angolo tra i fotoni, per cui è necessario determinarne la direzione: per questo al calorimetro è anteposto un rivelatore di posizione a strip di silicio (*preshower*).

Il calorimetro adronico consiste di una sezione nel barrel (HB), di due sezioni negli endcaps (HF) all'interno del solenoide e di un rivelatore di code fuori dal solenoide.

Ha il compito di misurare direzione ed energia dei jets di particelle e di provvedere a fornire una misura dell'energia trasversa mancante, copre il range $|\eta| \leq 3$. Deve avere buona ermeticità, moderata risoluzione energetica, buona capacità di distinguere jets diversi, sufficiente spessore di contenimento degli sciami adronici e range dinamico da 20 MeV a 2 TeV.

Gli elementi attivi sono costituiti da piastrelle di scintillatore plastico con lettura WLS, mentre l'assorbitore è formato da lastre di rame. La scelta del rame è dovuta a due ragioni: non è un materiale ferromagnetico (richiesta dal fatto che il calorimetro si trova all'interno del campo magnetico del solenoide) ed è tale da massimizzare il numero di lunghezze di interazione per le particelle adroniche (in modo da contenere lo spessore a 100 cm).

Il calorimetro VF (Very Forward calorimeter) copre il range $3.0 \leq |\eta| \leq 5.0$ ed è posto a ± 11 m dal punto di interazione; ha il compito di migliorare la misura dell'energia trasversa mancante e riconoscere i jets di particelle prodotte in avanti che sono caratteristici di importanti processi fisici. Per VF si richiede una moderata risoluzione energetica con un termine costante inferiore al 10% per singoli adroni e sufficiente risoluzione per i jets; deve avere un'ottima velocità di risposta e soprattutto alta resistenza alle radiazioni.

I.3 SISTEMA DI RIVELAZIONE DEI μ

Per la rivelazione del decadimento del bosone di Higgs, della W, della Z o di $t\bar{t}$ è necessaria un grande accettazione: il rivelatore nel barrel copre la regione $|\eta| < 1.3$, quelli negli endcaps la regione $0.9 < |\eta| < 2.4$.

Il sistema di rivelazione dei μ deve assolvere a tre compiti principali:

- identificazione con grande certezza;

- misura precisa del momento;
- deve svolgere compiti di trigger.

I.3.1 Performance

I muoni generati nelle collisioni p-p sono significativi di molti importanti processi, da cui l'importanza di una loro precisa identificazione e misura a partire da momenti di pochi GeV fino a qualche TeV, pertanto è necessario che la struttura del rivelatore garantisca i seguenti requisiti:

- grande copertura geometrica;
- identificazione: ci sono almeno 16λ di materiale in qualsiasi direzione che escludono il passaggio ad ogni altra particella;
- la risoluzione per il momento trasverso va dal 10% a 10 GeV al 30% a 1 TeV;
- il matching con il rivelatore centrale porta la risoluzione per il momento trasverso dal 1% a 10 GeV al 20% a 1 TeV, mentre per quanto riguarda la risoluzione spaziale per μ da 1 TeV è meno di 1 mm nel piano ortogonale al fascio ($r-\phi$) dove avviene la curvatura e meno di 10 mm in quello parallelo;
- assegnamento della carica corretta al 99% fino a momenti di 7 TeV;
- efficienza maggiore del 99% per il beam-crossing;
- trigger nel momento dei muoni da pochi GeV fino a 100 GeV.

I.3.2 Struttura del rivelatore

Il rivelatore di μ è posto dopo i calorimetri e la bobina del solenoide e consiste di 4 stazioni inserite tra gli anelli di ritorno del magnete. Lo spessore di ferro (da un minimo di 30 cm fino a 90 cm) previene possibili correlazioni tra una stazione e l'altra (per produzione di raggi delta o sciame elettromagnetici nell'interazione dei μ con il ferro o la struttura metallica dei rivelatori).

Nella Figura I.4 è mostrata la sezione longitudinale di CMS che evidenzia la struttura dell'intero rivelatore di μ . Il momento dei μ può essere misurato in tre modi diversi:

- attraverso la traiettoria nel tracker;
- attraverso l'angolo di curvatura subito dopo la bobina;
- attraverso la traiettoria negli anelli di ritorno.

Le ultime due determinazioni sono completamente indipendenti dalla misura del tracker: la loro combinazione permette una grande risoluzione e rende il sistema, data la ridondanza, estremamente robusto per la soglia di background anche a luminosità elevate. La risoluzione spaziale richiesta ad ogni stazione è di almeno 100 μm .

I rivelatori utilizzati all'interno delle singole stazioni sono diversi a seconda che queste siano nel barrel o negli endcaps: il basso rate (10 Hz/cm²) e il basso campo magnetico rendono possibile l'utilizzo di tubi a drift (DT) nel barrel, al contrario negli endcaps

l'alto rate e il grande, non uniforme, campo magnetico presente consigliano l'utilizzo delle CSC (Cathode Strip Chamber). Entrambi i rivelatori sono in grado di fornire informazioni di bunch crossing e di posizione per il trigger di primo livello.

Ogni stazione è inoltre equipaggiata con RPC (Resistive Plate Chamber) che hanno eccellente risoluzione temporale associata ad una discreta risoluzione spaziale per fornire un rivelatore di trigger di μ dedicato, necessario dato l'alto rate e background aspettati per LHC.

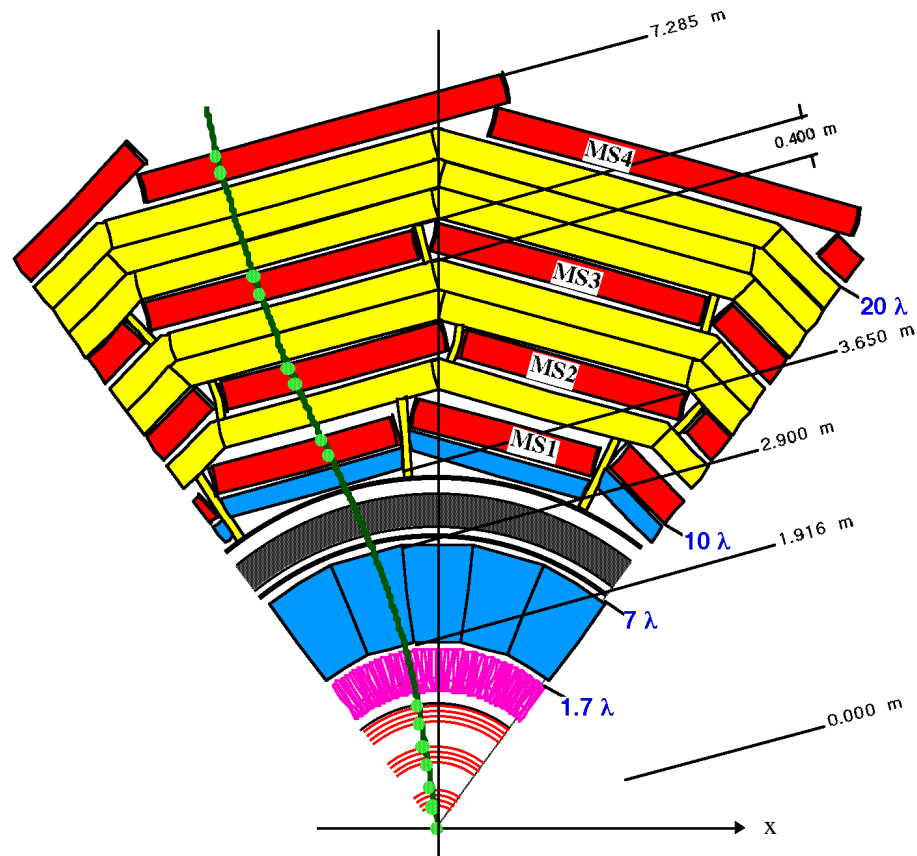


Figura I.8: vista in sezione di CMS con evidenziati due settori delle stazioni di misura dei μ nel barrel.

Le quattro stazioni del barrel, visibili nella sezione trasversale di CMS di Figura I.8, sono MS1, MS2, MS3, ed MS4: la prima stazione è posta subito dopo il solenoide per assicurare la migliore risoluzione nella misura del momento dei μ , la seconda dopo i 30 cm di ferro del primo anello di ritorno del magnete (sufficiente ad assicurare l'assorbimento di eventuali sciami elettromagnetici); l'ultima si trova dopo uno spessore di 1.8 m di ferro e può essere raggiunta solo dai μ .

Ogni stazione contiene un modulo di tubi a drift e un piano di RPC per MS3 e MS4, due piani di RPC per le altre due. Ciascun modulo di tubi a drift consiste in 12 piani di celle: 8 paralleli e 4 ortogonali al fascio.

I singoli moduli che formano le stazioni del barrel sono 240 divisi sulle 5 ruote del magnete e disposti in 12 settori di 30° per ruota, l'accesso è possibile dividendo le cinque ruote lungo i binari.

MS4 ha un'accettanza di quasi il 100%, MS1 e MS2 sono disposte in modo che un μ attraversi almeno una delle due; la disposizione di MS3 rispetto alle prime due assicura che ogni μ che esce dal barrel attraversi almeno tre stazioni; le uniche zone morte sono tra le ruote del barrel.

Nelle regioni di endcap le 4 stazioni di misura (MF1, MF2, MF3 e MF4) sono interposte fra i 3 dischi di ferro e il loro accesso è possibile, anche in questo caso, separando i dischi di ferro lungo i binari. Per evitare zone morte tra barrel ed endcaps, alla stazione MF1 sono state aggiunte MF1A ed MF1B.

I.3.3 Stazioni del barrel

Il progetto delle camere nel barrel è imposto dalle richieste per le stazioni MS1 e MS2: per un'ottima misura del momento trasversale esse devono dare la direzione del μ con una risoluzione di 1 mrad. Volendo contenere la risoluzione per piano dei tubi a $200 \mu\text{m}$ è necessario un braccio di leva di almeno 20 cm. Considerando che i due piani di RPC occupano 15 cm e che lo spazio utile nel gap di ferro è di 40 cm, lo spessore della camera deve essere non superiore a 25 cm.

Il rate richiesto è inferiore a 10 Hz/cm^2 consentendo così un tempo di drift di 400 ns. Per ridurre al minimo l'interferenza dei raggi delta e del bremsstrahlung dei muoni sono necessari almeno 6 piani di rivelatori indipendenti^[R4]: conseguentemente la struttura è basata su due separati super-piani (SL) ciascuno con 4 piani di rivelatori con un braccio da 15 a 20 cm.

La struttura è capace di trigger utilizzando una tecnica di meantiming; lo stesso tipo di struttura viene utilizzata per MS3 e MS4.

L'attuale progetto deriva dalle due iniziali proposte fatte nel *LoI*: la DTBX (Drift Tube Chamber with Bunch-Crossing Identification Capability) e la WLDC (Wall-Less Drift Chambers with Local Time Reference): la cella di drift ha una sezione di $4 \times 1.1 \text{ cm}^2$ e una distanza massima di drift di 2 cm, i fili che formano gli anodi sono di acciaio con diametro di $50 \mu\text{m}$, la miscela di gas è costituita da Argon e CO_2 , i tempi di drift vanno da un minimo di 320 ns ad un massimo di 400 ns a seconda delle percentuali di gas scelti nella miscela finale.

Ogni filo viene letto separatamente per un totale di 195000 canali elettronici.

Le 240 camere coprono una superficie di 1730 m^2 .

I tubi di drift sono di alluminio che offre una buona precisione e stabilità meccanica. In Figura I.9 si vede come l'aggiunta di un elettrodo all'iniziale cella proposta nel *LoI* migliori la regolarità del campo elettrico: questa nuova geometria ha buona linearità

spaziotemporale fino a concentrazioni di CO_2 del 20% nella miscela e diminuisce l'influenza del campo magneto sul drift degli elettroni.

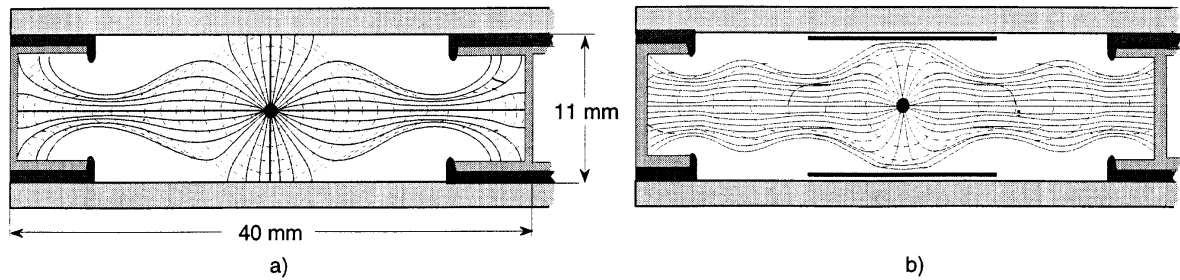


Figura I.9: schema delle due celle: in a) la proposta iniziale, in b) quella migliorata.

La camera consiste, come già detto, di 12 piani di tubi raggruppati in 3 super-piani (SL) di 4 piani ciascuno: i due SL più esterni ((r,φ) -SL) misurano la coordinata nel piano (r,φ) (in modo da avere il braccio di leva richiesto), mentre quello centrale (θ -SL) fornisce la coordinata lungo la direzione del fascio.

Per conferire maggiore stabilità alla struttura tra due SL è inserita una struttura a nido d'ape di alluminio (honeycomb) come si vede in Figura I.10.

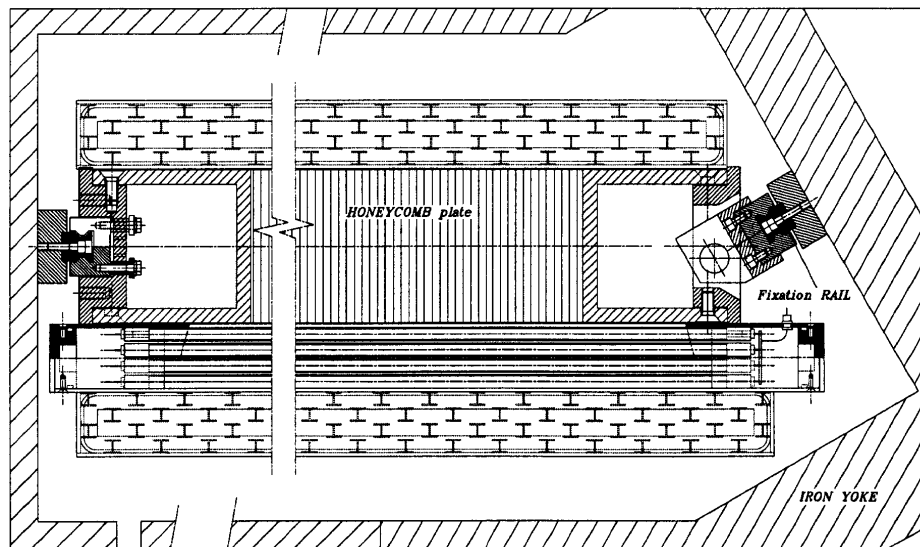


Figura I.10: vista in sezione della camera nel piano ortogonale al fascio: si vedono i 3 SL con interposta la struttura di honeycomb. Sopra e sotto trovano posto le RPC.

I piani in un SL sono sfalsati di mezza cella per migliorarne l'efficienza e risolvere l'ambiguità destra-sinistra tipica dei tubi a drift.

Le camere hanno una lunghezza di 2.56 m, come le ruote del magnete, e una larghezza da 2 m fino a 4 m per quelle più esterne.

1.3.3.1 *Tecnica costruttiva*

Le camere sono realizzate con lastre di alluminio di 2 mm di spessore distanziate da profilati a forma di I sempre in alluminio di 1.2 mm di spessore per un gap di 11 mm. Le I fungono da catodi e sono separate dalla lastra da materiale plastico isolante, precedentemente incollato. Sulle lastre sono pure incollati gli elettrodi per formare il campo (strips).

I fili sono crimpati a dei blocchetti di metallo che vengono inseriti in supporti di plastica posti tra le I con una precisione di 50 μm , in questo modo la precisione finale ricade sul posizionamento delle I.

La precisione meccanica richiesta nel processo di assemblaggio per ottenere le prestazioni volute è dell'ordine dei 100 μm . La risoluzione finale dipende soprattutto dalla precisione nel passo dei fili in uno stesso piano e dalla precisione nello sfalsamento dei singoli piani nel SL. Dentro queste tolleranze il guadagno è insensibile alla distanza tra anodi e strips.

Il peso per metro quadrato di una camera è di circa 120 Kg; si è calcolato che l'incurvamento delle camere montate sulle ruote è minore di 100 μm .

1.3.3.2 *Elettronica*

Nella Figura I.11 è mostrato il diagramma a blocchi dell'elettronica della camera: i segnali digitali forniti dai front end sono utilizzati sia per il trigger (MT-Correlator-Trigger Server) che per l'acquisizione dati (TDC-Readout Server).

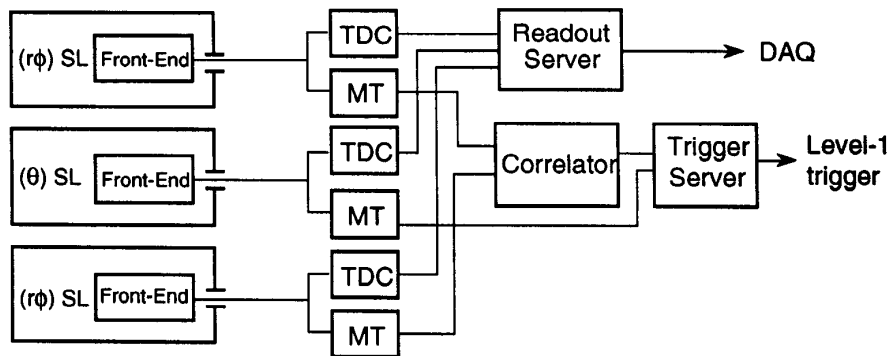


Figura I.11: schema a blocchi dell'elettronica dei DT.

Front End

I fili vengono letti da un preamplificatore, un discriminatore e un driver: si tratta dell'elettronica di front end montata nelle camere vicino ai fili per ridurre il rumore. Del front end si parlerà più in dettaglio nell'ultimo capitolo.

Test Pulses

Si è sviluppato un sistema per mandare degli impulsi di test agli anodi attraverso un accoppiamento capacitivo con l'alta tensione.

Trigger

Il trigger di primo livello richiede angolo e posizione della traccia del μ assieme all'identificazione del bunch-crossing per ogni camera. Per far questo è stato studiato un circuito dedicato di meantimer per ogni struttura di SL capace di identificare il bunch-crossing e determinare i parametri della traccia; il dispositivo cerca le tracce con almeno 3 hits su 4 in ciascun SL. L'allineamento avviene in un registro a scorrimento ad un tempo fissato dopo l'evento, corrispondente al massimo tempo di drift e permette l'identificazione del bunch-crossing.

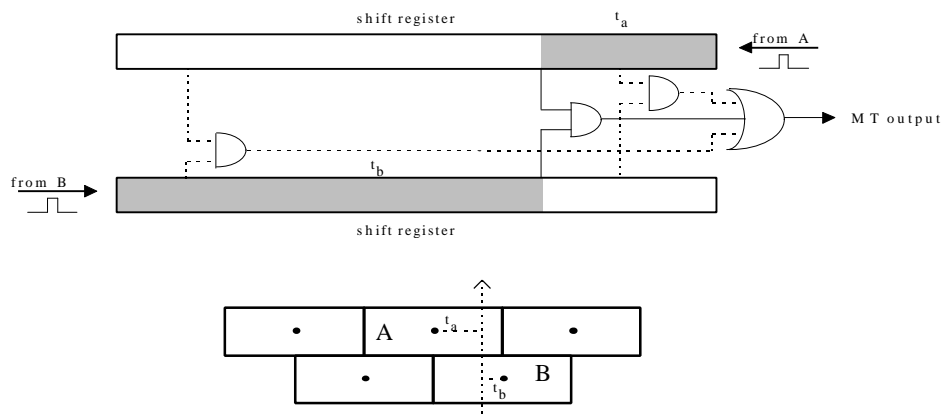


Figura I.12: schematizzazione del meantimer per due piani di tubi.

Per capire il meccanismo utilizzato consideriamo lo schema di Figura I.12. Un μ attraversa perpendicolarmente le celle A e B ed i segnali amplificati, discriminati e formati vengono mandati in due registri a scorrimento che ad ogni impulso di clock li propagano al loro interno alla stessa velocità con cui derivano gli elettroni nelle celle: la sovrapposizione avviene sempre ad uno stesso tempo rispetto all'istante iniziale del passaggio della particella.

L'utilizzo di più piani di tubi si rende necessario quando le particelle incidenti sono inclinate: in questo caso l'utilizzo di due soli piani conduce il MT a sbagliare.

L'angolo e la posizione della traccia si ricavano dalla disposizione degli hits al momento dell'allineamento, la risoluzione nella loro determinazione è fissata dalla frequenza di sampling del registro a scorrimento che è di 25 ns.

Il MT lavora con gruppi di 9 fili come si vede dalla Figura I.13. Il gruppo successivo di MT avanza di una cella in modo che tra due gruppi adiacenti c'è la sovrapposizione di 5 fili: questo assicura che gli hits di una traccia siano sempre contenuti in almeno un MT, tale sovrapposizione non crea duplicazioni nel trasferimento dati. Il meantimer manda in uscita sincronamente l'angolo trasverso della traccia rispetto alla verticale della camera (angolo ϕ nel disegno) e la coordinata della traccia rispetto al piano mediano del SL: assumendo una velocità di drift di $50 \mu\text{m/ns}$ e un periodo di clock del MT di 25 ns, la risoluzione angolare è di 50 mrad e quella spaziale di 1.25 mm.

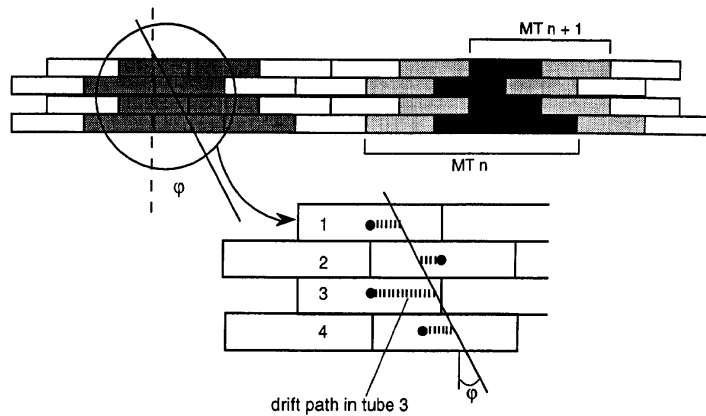


Figura I.13: tecnica del meantimer, ogni MT lavora con gruppi di 9 fili.

Per portare la risoluzione angolare a 12.5 mrad i due (r,ϕ) -SL vengono correlati: è il lavoro eseguito dai *MT Correlator*. I correlatori combinano le informazioni degli MT di due SL e ordinano le tracce attraverso il valore dell'angolo. Le due tracce più vicine alla direzione radiale sono passate al *Trigger Server* della camera che ha il compito di scegliere, tra tutte le tracce date dagli MT, le due candidate con la più piccola differenza angolare rispetto alla direzione radiale.

Gli MT vengono utilizzati anche per il SL con fili longitudinali θ -SL per migliorare l'identificazione del bunch-crossing. L'informazione angolare è utilizzata per selezionare solo le tracce che puntano verso il punto di interazione.

I.3.4 Allineamento

La più alta precisione per la misura del momento dei μ è raggiunta combinando i dati del rivelatore centrale e delle stazioni di muoni. Lo scopo dell'allineamento è quello di mettere in relazione ad ogni istante la posizione nello spazio degli elementi dei due sistemi.

Nella Tabella I.4 sono riportate le precisioni nelle misure di allineamento richieste affinché il deterioramento nella misura del momento dei μ sia inferiore al 15%.

Tabella I.4

coordinata	MS1-MS4 (mm)	MF1-MF4 (mm)
j	75÷120	50÷100
r	120÷175	500÷1000
z	250÷350	500÷1000
errore totale	100÷150	55÷110