

CAPITOLO 1

LHC e l'esperimento ATLAS

Questo capitolo illustra le caratteristiche generali dell'acceleratore di particelle LHC e di uno dei quattro grandi esperimenti che vi verranno realizzati: l'esperimento ATLAS [1]. Vengono descritte le motivazioni fisiche alla base della costruzione di questo nuovo acceleratore e della realizzazione dell'esperimento ATLAS; successivamente sono passati in rassegna i vari elementi che costituiscono l'apparato sperimentale dell'esperimento ATLAS, ossia rivelatori di vertice, calorimetri adronici ed elettromagnetici e il sistema magnetico. Si danno, inoltre, dei cenni sullo spettrometro per muoni e sul sistema di trigger e di acquisizione dati, che verranno analizzati con maggior dettaglio nel capitolo successivo.

Gli obiettivi fisici

La fisica delle alte energie è continuamente rivolta all'esplorazione di nuove frontiere della conoscenza ed uno degli obiettivi che vengono

attualmente perseguiti è la ricerca del bosone di *Higgs*, ultimo tassello mancante del *Modello Standard*.

Il *Modello Standard* raggruppa tre delle quattro interazioni fondamentali conosciute, l'interazione forte, la debole e l'elettromagnetica, in una formulazione in termini di campi, di particelle a spin semintero (fermioni), che costituiscono tutta la materia conosciuta, e di particelle a spin intero (bosoni) responsabili di mediare tali interazioni. In particolare, otto bosoni (i gluoni) sono i mediatori dell'interazione forte tra quarks, uno (il fotone) riguarda l'interazione elettromagnetica tra particelle elettricamente cariche, ed altri quattro, massivi, sono stati previsti dal modello: tre riguardano l'interazione debole, i bosoni W^+ , W^- , Z^0 , e un altro, il bosone di *Higgs*, è stato ipotizzato per risolvere i problemi che nascevano nella teoria elettrodebole a seguito della richiesta di invarianza di gauge e di rinormalizzabilità.

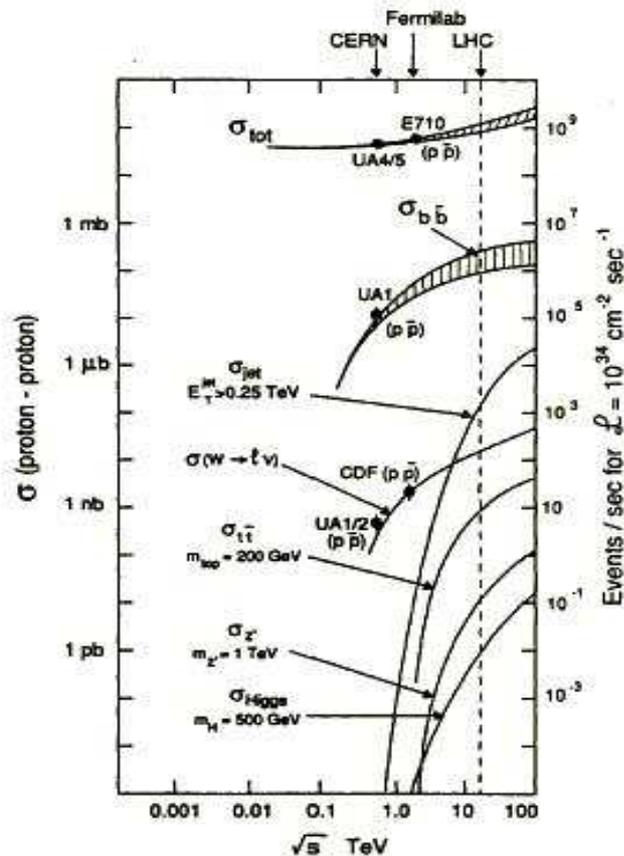


Figura 1.1 Sezione d'urto protone-protone in funzione dell'energia nel centro di massa

Il grande potere predittivo del *Modello Standard* è stato confermato dall'evidenza sperimentale con la scoperta delle correnti deboli neutre, negli anni '70, e dei bosoni W^\pm , Z^0 al CERN nel 1983, ma non c'è ancora evidenza sperimentale del bosone di *Higgs*, probabilmente a causa delle energie troppo basse raggiunte finora negli acceleratori. Uno degli obiettivi dell' LHC è proprio la scoperta del bosone di *Higgs*.

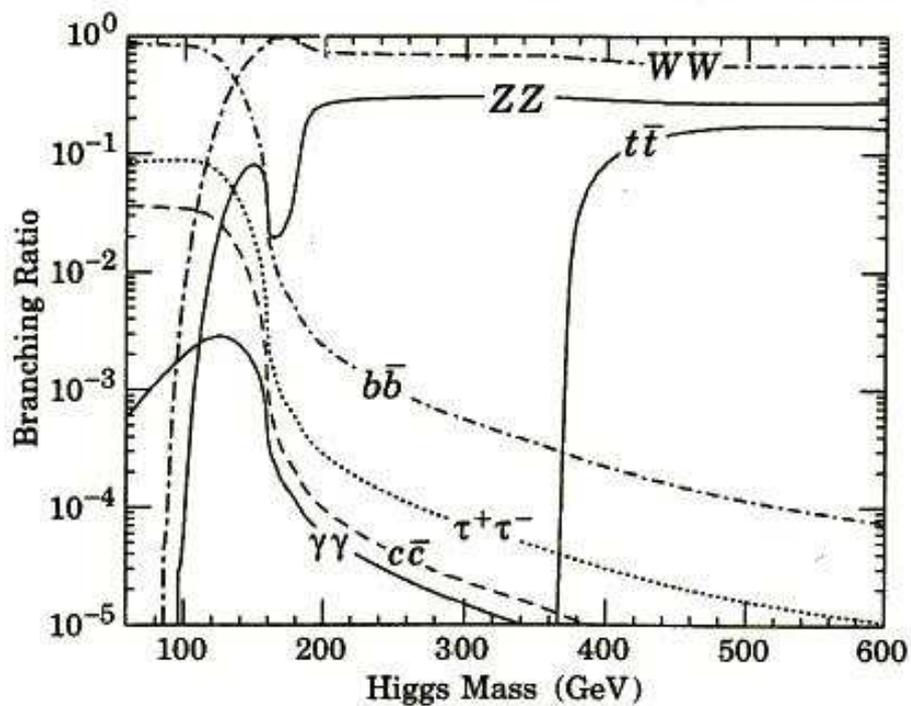


Figura 1.2 Branching ratio per i diversi canali di decadimento del bosone di *Higgs*

La figura 1.1 mostra le sezioni d'urto del processo protone-protone (si può notare quella di produzione di un bosone di *Higgs*, nell'ipotesi di una massa dell'*Higgs* di 500 GeV), mentre in figura 1.2 sono riportati i rapporti di decadimento (*Branching Ratio*) di un bosone di *Higgs* nei vari canali, in funzione della massa del bosone stesso. Alcuni processi possono maggiormente essere utili e semplici da rivelare, anche in relazione ai

prodotti di decadimento, rispetto ad altri. Ad esempio, processi in cui ci sono neutrini nello stato finale richiedono studi di energia mancante, o processi che hanno *jets* adronici come eventi di *background* sono di più complessa ricostruzione. I decadimenti che sembrano essere più promettenti per la rivelazione dell'*Higgs* sono:

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni (in particolare con elevato impulso trasverso, } p_T > 7 \text{ GeV/c)}$$

$$H \rightarrow ZW^* \rightarrow 2 \text{ leptoni} + 2\nu$$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptoni}$$

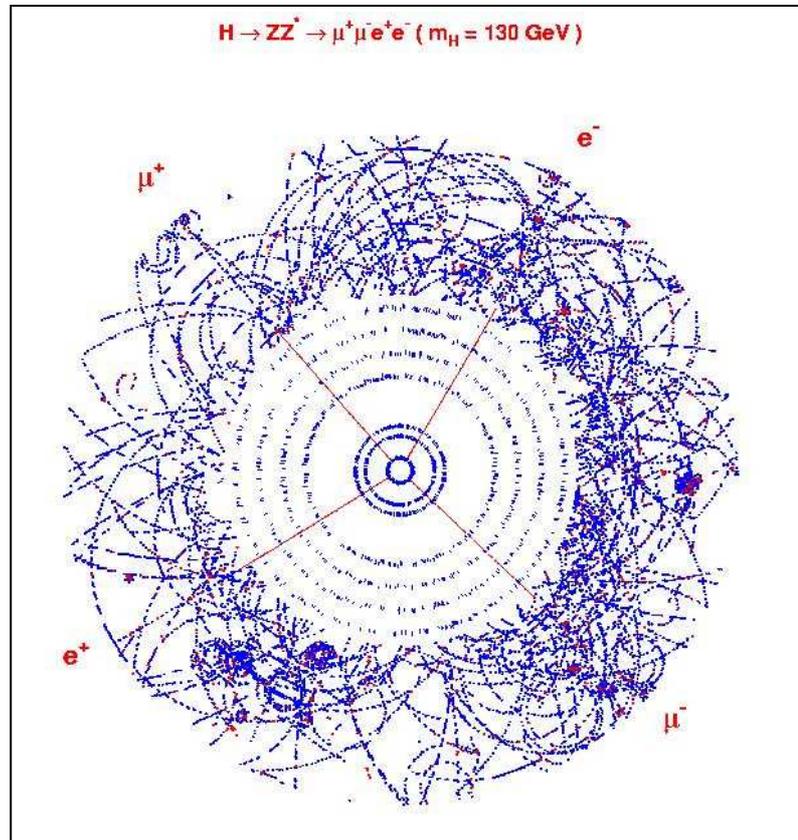


Figura 1.3 Simulazione del decadimento $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$
nell'ipotesi $m_H = 130 \text{ GeV}/c^2$

In ogni caso saranno necessarie elevatissime prestazioni da parte dei singoli rivelatori dell'apparato. Sono richieste una buona risoluzione in

energia, per identificare e separare elettroni, leptoni e jets dalle coppie $\gamma\text{-}\gamma$, e una altrettanto buona precisione per la ricostruzione dei vertici di interazione. Se si pensa che questo dovrà succedere in un ambiente soggetto ad elevati flussi di radiazione ionizzante, si comprende facilmente come tutto l'esperimento rappresenti realmente una sfida alle prestazioni raggiungibili dalle attuali tecnologie.

Un altro aspetto ancora parzialmente inesplorato riguarda lo studio dei sistemi di quark pesanti. Obiettivo dello studio che sarà condotto ad LHC sarà la determinazione della massa del quark *top* con una risoluzione inferiore a $0.05 \text{ GeV}/c^2$. Per tale scopo l'evento più interessante è il decadimento

$$t \bar{t} \rightarrow b \bar{b} W(jj) W(l\nu)$$

e l'apparato dovrà perciò essere in grado di rivelare leptoni nello stato finale e ricostruire vertici di decadimento secondari. Queste caratteristiche serviranno anche per indagare la fisica del mesone B^0 , ad esempio per lo studio del decadimento raro

$$B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- (X)$$

oppure di quello

$$B_d^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$$

utile nell'analisi della violazione di CP.

L'acceleratore *LHC* è stato progettato per investigare la fisica delle particelle elementari in un range di energie non ancora raggiunto, ed avrà dunque come obiettivo lo studio di gran parte dei problemi ancora aperti:

- la ricerca dell'evidenza sperimentale dell'esistenza del bosone di *Higgs* e l'origine della violazione spontanea della simmetria elettrodebole;

- lo studio della violazione diretta di CP e la misura dei parametri della matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa;
- la fisica dei quarks pesanti, in special modo il B e il T;
- l'esistenza di una eventuale struttura composta dei quarks;

Inoltre, le energie raggiungibili lasciano sperare in nuove ed inattese scoperte.

Il Large Hadron Collider

Il *Large Hadron Collider* è un acceleratore di particelle circolare, progettato per produrre collisioni protone-protone (p-p) con una energia nel centro di massa di circa 14 TeV.

L'acceleratore verrà costruito nel tunnel di 27 Km che ha ospitato il *LEP* (*Large Electron-Positron collider*). Per raggiungere energie di fascio di circa 7 TeV, è composto da diversi sottosistemi che accelerano gradualmente le particelle prima di iniettarle nel *Large Hadron Collider*, come mostrato in figura 1.4. Dopo la produzione, i protoni sono accelerati fino a 50 MeV nell'acceleratore lineare LINAC, successivamente ad 1 GeV nel “*Booster*” e poi a 26 GeV nel *PS* (Sincrotrone a Protoni); infine, prima dell'*LHC*, l' *SPS* (Super Sincrotrone a Protoni) accelera ulteriormente i protoni fino a 450 GeV.

LHC lavorerà a due differenti luminosità: per i primi tre anni funzionerà a bassa luminosità ($10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) permettendo lo studio della fisica dei quarks pesanti ed una prima ricerca del bosone di *Higgs*, poi lavorerà in regime di alta luminosità ($2.5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), per compensare le basse sezioni d'urto degli eventi di produzione dell'*Higgs*. L'alta luminosità potrà così garantire una alta frequenza di produzione di eventi interessanti e bilanciare le

eventuali perdite dovute alla selezione effettuata per rigettare gli eventi di fondo.

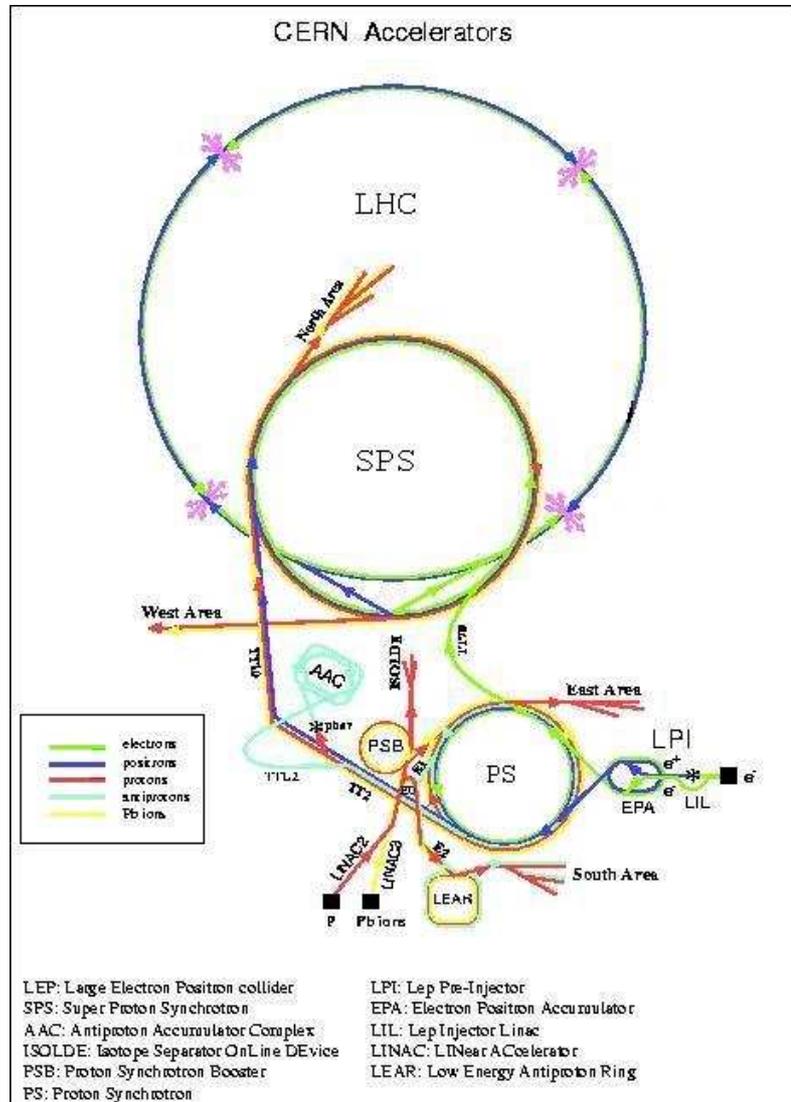


Figura 1.4 Il sistema di iniezione dei protoni ad LHC

L'elevata luminosità di LHC, infatti, è una delle più interessanti caratteristiche dell'acceleratore, poiché consentirà di studiare anche eventi con bassissime sezioni d'urto. La frequenza R con cui è possibile produrre un certo evento è legata alla dinamica del processo, e cioè alla sezione d'urto σ , ed alla tecnologia di produzione di fasci di particelle molto concentrati, e cioè alla luminosità L . Di conseguenza, dalla relazione che dà

R ($R = \sigma L$), a patto di avere alte luminosità, è possibile osservare eventi con σ molto basse.

La luminosità della macchina si può esprimere come segue:

$$L = \frac{N^2 k_b f_{\text{rev}} E}{m_p 4\pi \beta^* \varepsilon} F$$

dove N è il numero di protoni per pacchetto, k_b è il numero di pacchetti, f_{rev} è la frequenza di rivoluzione dei pacchetti, F è un fattore che tiene conto della non esatta collimazione dei fasci ($F \sim 0.9$), m_p è la massa del protone, β^* riguarda la focalizzazione dei fasci, E è l'energia del fascio ed ε è l'emittanza trasversa normalizzata, una grandezza conservata che è legata alle dimensioni trasversali del fascio.

Nei fasci dell'LHC i protoni viaggiano in pacchetti (*bunch*) che si incrociano ogni 25 ns: poiché la sezione d'urto protone-protone stimata σ_{p-p} a 14 TeV è di circa 110 mb, alla luminosità di $10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ si avranno circa 27 interazioni per ogni *bunch crossing*, dalla formula

$$N = L \cdot \sigma_{p-p} \cdot \Delta t \sim 27$$

Corrispondenti a $\sim 1.1 \times 10^3$ Hz.

Per le interazioni che riguardano un *Higgs* nello stato finale, la sezione d'urto sarà molto minore (ad esempio, per la produzione di un bosone di *Higgs* di massa presunta di 200 GeV, σ ($gg \rightarrow H$) ~ 10 pb), e la frequenza di produzione di un *Higgs* per fusione di due gluoni, nel caso preso come esempio, risulta essere

$$\sigma (gg \rightarrow H) \cdot L \sim 10\text{pb} \cdot 10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1} = 0.1 \text{ Hz}$$

e cioè dovrebbe essere prodotto un bosone di *Higgs* ogni 10 secondi.

La tabella 1.1 contiene i principali parametri di funzionamento di *LHC*.

Energia per fascio (E)	7 TeV
Campo magnetico dipolare	8.28 Tesla
Luminosità istantanea	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Lunghezza dell'acceleratore	26.66 Km
Frequenza di rivoluzione (f_{rev})	11.246 KHz
Numero di protoni per pacchetto (N)	10^{11}
Numero di pacchetti (k_b)	2835
Corrente circolante	0.53 A
Distanza tra i pacchetti (Δt)	25 ns
Emittenza trasversa normalizzata (ϵ)	$3.75 \mu\text{m rad}$
Funzione β nei punti di interazione (β)	0.5 m
Angolo di incrocio dei fasci nei punti di interazione (α)	$200 \mu\text{rad}$
Tempo di vita del fascio	22h
Tempo di vita della luminosità	10 h
Perdita di energia per giro	6.9 KeV
Potenza totale irradiata per fascio	3.7 KW

Tabella 1.1 I principali parametri del *Large Hadron Collider*

L'esperienza ATLAS

ATLAS è un rivelatore di forma cilindrica di 46 m di lunghezza ed un diametro di circa 22 m che verrà costruito intorno ad uno dei quattro punti di intersezione dei fasci ad *LHC*.

La sua struttura è mostrata in figura 1.5, dove è riportato uno spaccato dell'apparato: nelle vicinanze del punto di interazione dei fasci c'è un rivelatore di tracciamento, e via via, verso l'esterno si trovano un

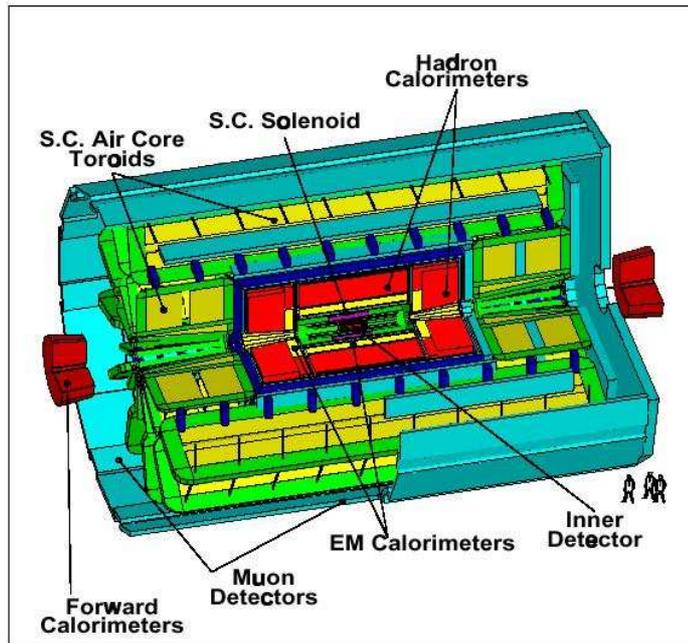


Figura 1.5 L'insieme dei rivelatori dell'apparato ATLAS

calorimetro elettromagnetico, un calorimetro adronico e un rivelatore di muoni, tutti immersi in un campo magnetico realizzato per poter curvare le particelle cariche e poterne identificare la natura e studiarne le caratteristiche cinematiche.

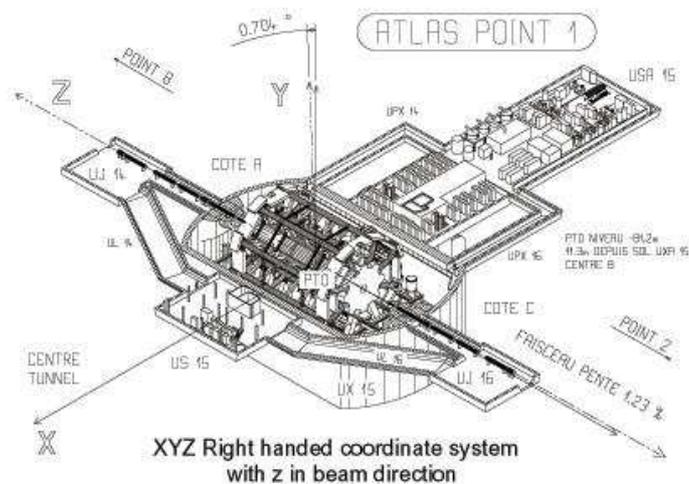


Figura 1.6 Il sistema di riferimento dell'apparato ATLAS

In figura 1.6 è mostrato il sistema di riferimento utilizzato per l'esperimento ATLAS. L'asse z è disposto lungo la direzione di intersezione dei fasci, l'asse x è diretto verso il centro dell'anello di accumulazione; l'angolo azimutale φ è riferito, nel piano x - y , all'asse x , mentre l'angolo polare θ è riferito, nel piano r - z , all'asse z .

Viene inoltre utilizzata la variabile pseudorapidità η , definita come: $\eta \approx -\ln(\tan(\theta/2))$, che permette di dividere il rivelatore in quattro zone, come mostra la figura 1.7: *Barrel*, *Transition*, *End-cap* e *Forward*.

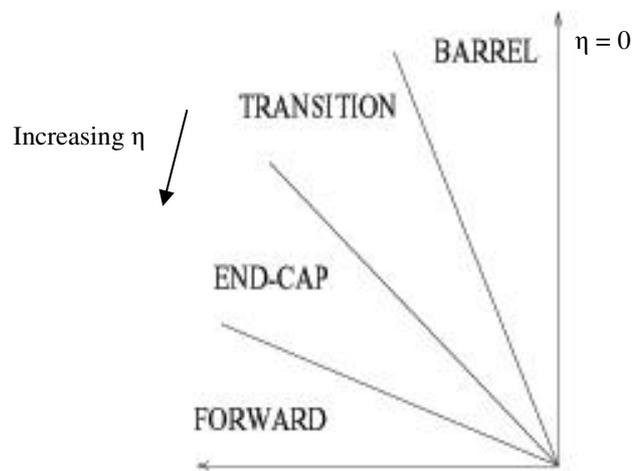


Figura 1.7 Le regioni definite dalla pseudorapidità nel rivelatore

Date le elevate prestazioni che dovrà fornire, il rivelatore dovrà soddisfare alcuni requisiti fondamentali, che sono:

- Un sistema di tracciamento ad altissima risoluzione, che consenta la ricostruzione dei vertici secondari di decadimento dei quark pesanti.
- Una buona risoluzione del calorimetro elettromagnetico per l'identificazione di elettroni e fotoni.
- Un buon calorimetro adronico per misure accurate di energia allo scopo di identificare i *jet*.

- Uno spettrometro per muoni capace di fornire misure di momento con alta precisione.
- Ampia accettazione in pseudorapidità (η) e copertura pressochè totale in angolo azimutale (ϕ) per misurare l'energia mancante.
- Elevata efficienza di trigger per tutti i processi fisici di interesse.

Il rivelatore interno

Il rivelatore interno (*Inner detector*) circonda la zona di interazione dei fasci ed ha una forma cilindrica, con una lunghezza di 6.8m e diametro esterno di 2.30m. Il rivelatore è immerso in un campo magnetico di intensità 2 Tesla, parallelo all'asse del fascio, generato da un solenoide superconduttore a temperature criogeniche.

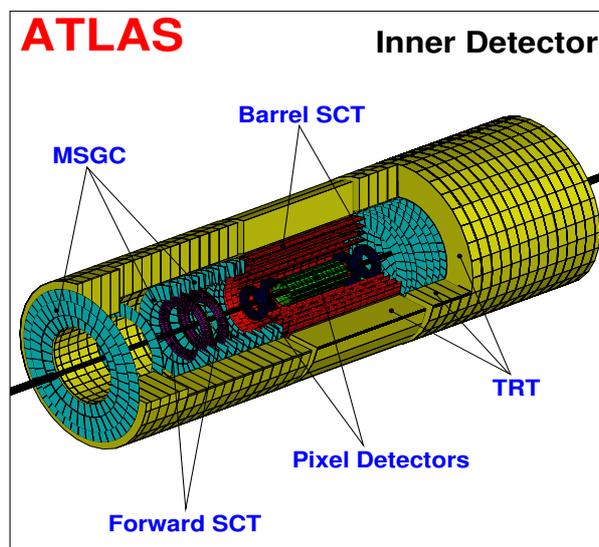


Figura 1.8 L'Inner Detector

Il compito principale di questo apparato è la ricostruzione di tracce e la misura di impulsi di particelle cariche, fornendo anche misure di posizione

dei vertici primari e secondari dei decadimenti di particelle a breve vita media, quali $B_d^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ oppure come $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, con la necessità di identificare le particelle prodotte, come K o Λ .

L'inner detector è costituito da due parti principali: una parte interna ad altissima risoluzione e ad elementi discreti, ed una esterna ad elementi traccianti continui. La parte interna è formata da due strutture concentriche, una composta da rivelatori a *pixels* (in silicio) e l'altra composta da rivelatori a *microstrips*, mentre la parte esterna è costituita da rivelatori a tubi.

- Rivelatori a *pixel*: sono i rivelatori più vicini al punto di collisione. I *pixel* sono sottili regioni rettangolari di silicio delle dimensioni di $50 \times 300 \mu\text{m}^2$ e sono disposti su tre superfici cilindriche attorno all'asse del fascio, nella regione di *barrel*, e su cinque dischi concentrici con l'asse stesso, nelle regioni di *end-cap*.

Ogni volta che una particella carica attraversa una di queste superfici, viene prodotto un segnale che identifica il *pixel* che è stato attraversato. L'alta granularità dei componenti garantisce una elevata risoluzione, $\sigma_{R\phi} \sim 12 \mu\text{m}$ e $\sigma_z \sim 66 \mu\text{m}$.

- Rivelatori a *microstrips*: gli elementi sensibili al passaggio di particelle cariche sono, stavolta, strisce (*strip*) di silicio, della larghezza di $80 \mu\text{m}$. Le superfici con le strisce seguono la stessa disposizione geometrica dei *pixel*, con otto superfici cilindriche di *strip* nella zona *barrel* e nove dischi nella zona *end-cap*; inoltre le strisce sono disposte parallelamente all'asse del fascio, nella regione di *barrel*, e radialmente nella regione di *end-cap*. La risoluzione spaziale raggiungibile è $\sigma_{R\phi} \sim 16 \mu\text{m}$ e $\sigma_z \sim 580 \mu\text{m}$.

• Rivelatori a radiazione di transizione (*Transition Radiation Tracker*): rivelatori a gas che sfruttano la radiazione di transizione prodotta dal passaggio di elettroni. Sono tubi del diametro di 4mm e lunghi fino a 144cm, contenenti sottili fili posti lungo l'asse del tubo e riempiti con una opportuna miscela di gas, che viene ionizzata al passaggio delle particelle dando informazioni temporali sugli eventi interessanti. Tra la superficie del tubo ed il filo interno viene mantenuta una differenza di potenziale costante, e lo spazio tra i tubi è riempito con Polipropilene, materiale che al passaggio di elettroni emette fotoni X.

L'elettronica di *front-end* dei rivelatori a tubi ha due soglie programmabili. E' possibile così distinguere il segnale dovuto a particelle cariche da quello dei fotoni emessi dagli elettroni per radiazione di transizione. Ciò consente una significativa efficienza nella separazione e/π . I tubi sono disposti parallelamente all'asse del fascio nella regione di *barrel* e radialmente nella regione di *end-cap*, e la risoluzione spaziale raggiungibile è $\sigma_{R-\varphi} \sim 170 \mu\text{m}$.

Il sistema magnetico

Come già anticipato, è essenziale avere a disposizione campi magnetici per curvare le traiettorie delle particelle cariche ed esistono due strutture diverse per creare tali campi: un solenoide superconduttore, che fornisce un campo magnetico di 2 Tesla per il rivelatore interno, ed un magnete toroidale superconduttore esterno, che fornisce un campo magnetico variabile dai 3 ai 6 Tesla (dipendente dalla pseudorapidità) per lo spettrometro a muoni. Il magnete esterno ha una configurazione cilindrica ed è formato da tre parti, una nella regione di *Barrel* e due nelle regioni di *end-cap*, ed ognuna è composta da otto avvolgimenti indipendenti disposti

secondo una simmetria ottagonale; la maggior parte degli avvolgimenti è raffreddata con Elio liquido alla temperatura di 4.5 Kelvin.

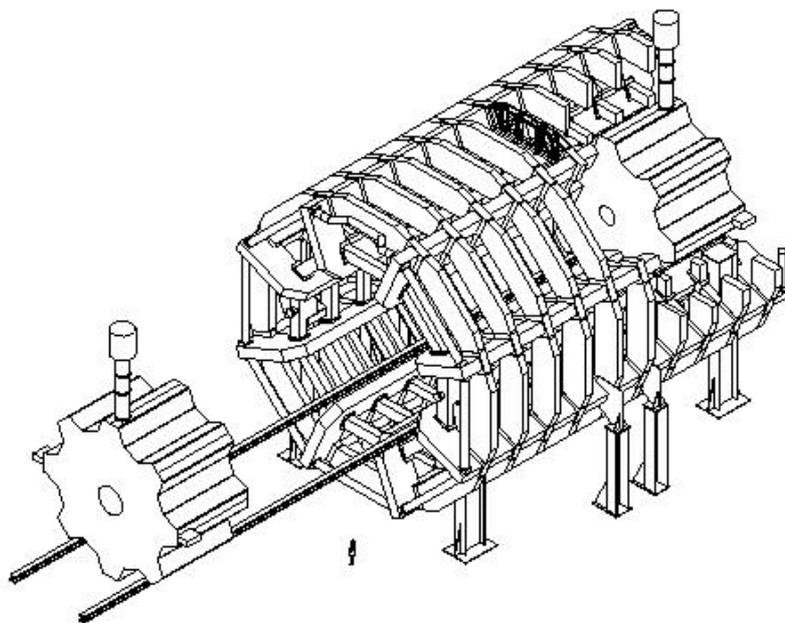


Figura 1.9 Il sistema magnetico di ATLAS

Il sistema dei calorimetri

Il sistema di calorimetria di ATLAS è costituito da un calorimetro elettromagnetico, che copre un intervallo in pseudorapidità $|\eta| < 3.2$, con una parte *barrel* e una *end-cap*, ed un calorimetro adronico che copre anche una regione nella parte *forward* $|\eta| < 4.9$.

Un calorimetro è un rivelatore in grado di misurare l'energia che una particella deposita, sotto forma di "cascata" elettromagnetica o adronica, al passaggio nel rivelatore. I calorimetri utilizzati nell'apparato ATLAS, in

particolare, sono calorimetri che alternano strati di materiale sensibile e strati di materiale assorbente.

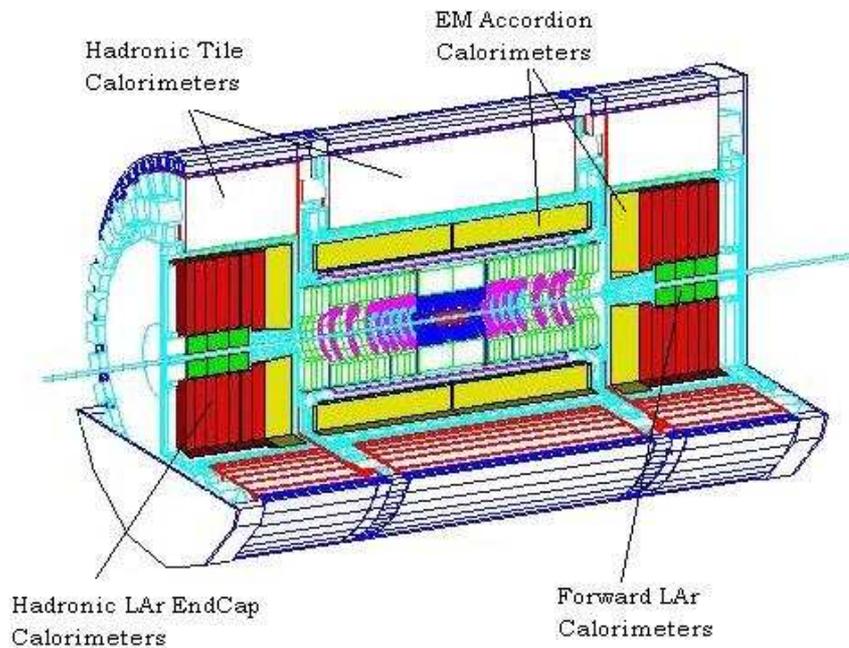


Figura 1.10 Il sistema dei calorimetri

Il calorimetro elettromagnetico

Il calorimetro elettromagnetico è un rivelatore ad Argon liquido e Piombo, composto da una parte cilindrica nella regione di *barrel* e due dischi nella regione di *end-cap*. Gli strati di piombo e gli elettrodi di raccolta della carica, in particolare, sono sagomati secondo una geometria a “fisarmonica”: questa configurazione consente di ridurre il rumore dell’apparato e contenere la sovrapposizione dei segnali indotti da eventi diversi.

La risoluzione in energia del calorimetro elettromagnetico si può esprimere come la somma in quadratura di tre termini indipendenti:

$$\sigma(E)/E = a/\sqrt{E} \oplus b/E \oplus c$$

dove a rappresenta la fluttuazione statistica, b è il termine di rumore e c tiene conto degli effetti sistematici.

Alle energie comprese tra i 2 GeV e i 5 TeV, caratteristiche degli eventi

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ leptoni

$W' \rightarrow l\nu$

rilevanti nella ricerca del bosone di *Higgs* e di particelle supersimmetriche, la risoluzione risulta essere circa del $10\%/\sqrt{E}$, con E espresso in TeV.

Il calorimetro adronico

Il calorimetro adronico è anch'esso composto da tre parti, una cilindrica e due nelle estremità, ma copre un intervallo di pseudorapidità più esteso del calorimetro elettromagnetico, fino a $|\eta| < 4.9$.

Le condizioni di fondo differenti nelle regioni di *barrel* e di *end-cap* impongono l'uso di diverse tecnologie: nell'intervallo $|\eta| < 1.7$ sono utilizzati ferro, come materiale assorbente, e scintillatori come mezzo sensibile; nell'intervallo $1.5 < |\eta| < 4.9$, dove il flusso atteso di particelle è maggiore, viene utilizzata una tecnologia simile a quella del calorimetro elettromagnetico, alternando strati di Argon liquido e rame.

Anche nel caso adronico si può parametrizzare la risoluzione in energia come somma in quadratura di tre termini indipendenti:

$$\sigma(E)/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\% \quad |\eta| < 3$$

e

$$\sigma(E)/E = 100\%/\sqrt{E} \oplus 10\% \quad 3 < |\eta| < 5$$

Riassumendo, nella realizzazione dei calorimetri si sono tenute presenti le seguenti richieste:

- Una buona risoluzione in energia su tutto l'intervallo in η ricoperto.
- Una buona linearità in risposta su un intervallo che varia tra i GeV ed i TeV.
- Una uniformità di prestazioni sia in η che in φ .

Lo spettrometro per muoni

Nella parte più esterna dell'apparato ATLAS si trova lo spettrometro per la rivelazione di muoni [2]. Occupa un volume di circa 16000 m³ ed ha un duplice ruolo: eseguire misure accurate di posizione e momento e fornire il trigger di muoni dell'esperimento. In particolare sono richieste:

- Una risoluzione in momento inferiore al 10%, fino a valori di momento trasverso $p_T \sim 1$ TeV/c.
- Una risoluzione $\sim \mu\text{m}$ nella misura della posizione delle particelle in direzione η e inferiore a 10 mm in direzione φ .
- Una buona capacità di ricostruzione di eventi i cui stati finali sono caratterizzati dalla presenza di 2 o 4 muoni, eventi che possono essere ricondotti al decadimento del bosone di *Higgs*.
- Una selettività del sistema di trigger fino a $p_T > 20$ GeV/c.

A causa delle esigenze differenti, quali l'alta risoluzione delle camere di precisione, il basso costo di produzione, la resistenza alla radiazione, il

basso tempo di risposta per i rivelatori di trigger, sono stati scelti quattro rivelatori diversi, in base ai compiti da assolvere. Sia per le misure di precisione che per le camere di trigger, vengono utilizzati rivelatori a gas: tale scelta è giustificata principalmente dal fatto che consentono la copertura della superficie esterna dei rivelatori a costi relativamente bassi.

Per le misure di posizione vengono utilizzate *Monitored Drift Tubes* (MDT) e, nella regione ad alta pseudorapidità, *Cathode Strip Chambers* (CSC). I rivelatori MDT sono costituiti da tubi a deriva di forma cilindrica, con una risoluzione di $\sim 80 \mu\text{m}$; i rivelatori CSC sono camere a deriva usate per ottenere una migliore risoluzione spaziale, dovendo ricostruire tracce di particelle con momento trasverso più elevato: la risoluzione è di $\sim 60 \mu\text{m}$, ottenuta con metodi di divisione di carica.

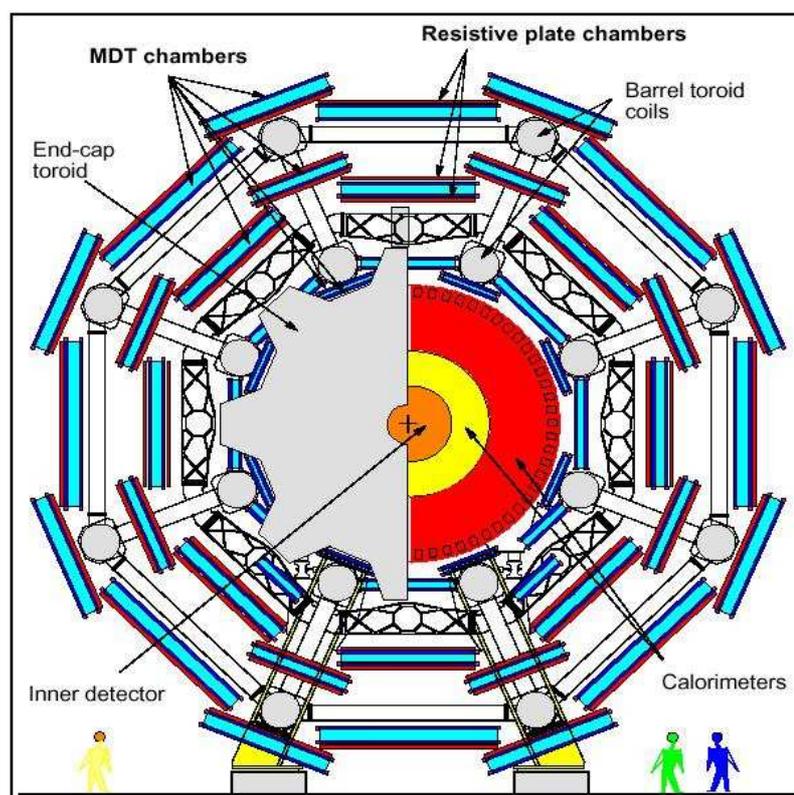


Figura 1.11 La struttura dello spettrometro nella regione di *barrel*

Per le misure di trigger sono usate stazioni di *Resistive Plate Chambers* (RPC), rivelatori a ionizzazione a piatti resistivi, nella regione centrale ($|\eta| < 1.05$) e *Thin Gap Chambers* (TGC), camere proporzionali multifilo, nelle regioni di transizione e di *end-cap*.

I rivelatori di precisione e di trigger si trovano su tre superfici cilindriche nella regione di *barrel*, disposte a distanza di $\sim 5, 7.5$ e 11 metri dall'asse del fascio; nelle due regioni di *end-cap* i rivelatori si trovano su 4 stazioni verticali, a distanza di $\sim 7, 10, 14$ e 22 metri dal punto di interazione.

La figura 1.12 riporta la risoluzione in momento dell'apparato ad $|\eta|=0$. Essa è influenzata, oltre che dalla risoluzione intrinseca dei rivelatori, anche dalla diffusione multipla, da fluttuazioni statistiche nella perdita di energia e dall'allineamento delle camere. In ogni caso, la risoluzione è inferiore al 10%, anche ad energie di ~ 1 TeV.

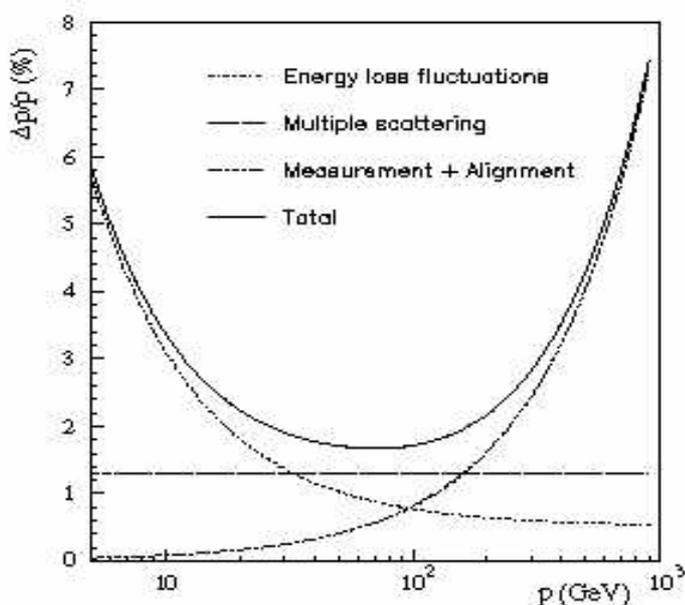


Figura 1.12 La risoluzione in momento dello spettrometro, ad $|\eta|=0$.

Una accurata descrizione dello spettrometro e di tutti i rivelatori che lo compongono, in particolare per la regione di *barrel*, verrà fornita nel prossimo capitolo.

Il sistema di trigger e di acquisizione dati

Come già accennato, data l'enorme quantità di eventi di fondo attesi, si rende necessaria la progettazione di un sistema di trigger estremamente selettivo. Si pensi, ad esempio, che alla luminosità nominale di LHC, nella ricerca del bosone di *Higgs* ad energie di $\sim 80 - 100$ GeV, sono previsti 1.7×10^3 eventi interessanti su 1.7×10^{16} prodotti.

Il sistema di trigger ed acquisizione dati dell'apparato ATLAS è organizzato su tre livelli differenti [3]. Il primo livello riceve i dati esclusivamente dal rivelatore, mentre ognuno degli altri due livelli elabora i dati dell'evento e le informazioni raccolte al livello precedente. L'architettura del sistema di trigger nei suoi tre livelli è mostrata in figura 1.13.

Il trigger di primo livello deve identificare, senza ambiguità, il *bunch crossing* con l'evento interessante, utilizzando solo i dati provenienti dai calorimetri e dallo spettrometro, ed usa processori paralleli sincroni che lavorano alla frequenza di *bunch-crossing*, cioè 40 MHz. Si usano dispositivi logici programmabili (*FPGA* e *CPLD*) e circuiti *ASIC* (*Application Specific Integrated Circuit*).

I dati prodotti nel rivelatore vengono elaborati dal trigger di livello 1, con un tempo di latenza inferiore ai $2.5 \mu\text{s}$, durante il quale le informazioni sono immagazzinate in memorie "*FIFO*" (*first-in first-out*); la frequenza di uscita dei dati è di 75 KHz, incrementabile fino a 100 KHz.

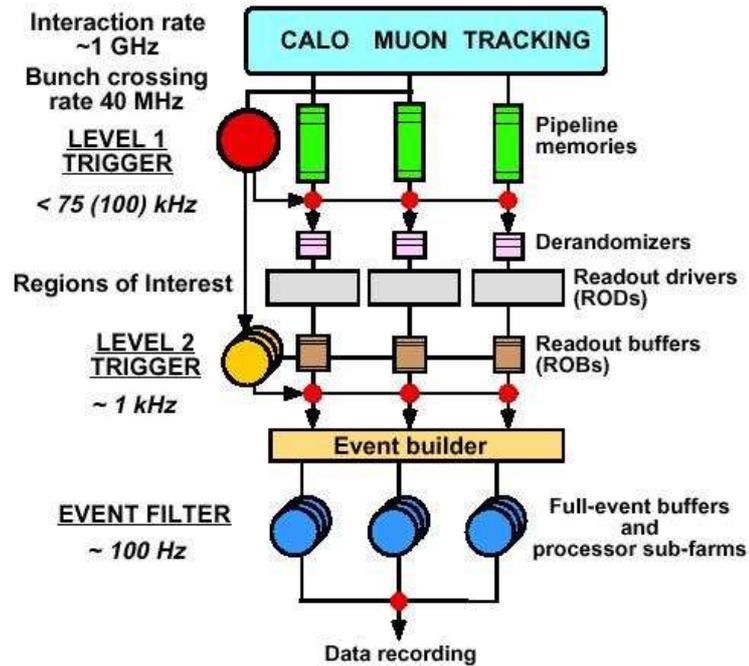


Figura 1.13 I tre livelli del sistema di trigger

Più in particolare, come mostrato in figura 1.14:

- il *Muon Trigger Processor* riceve i dati da TGC ed RPC, rispettivamente dalle regioni di *end-cap* e di *barrel*; riconosce eventi che hanno nello stato finale muoni con momento trasverso maggiore di una soglia programmabile e ne individua la regione spaziale di provenienza
- il *Calorimeter Trigger Processor* identifica elettroni, fotoni, adroni e *jets*, e misura l'eventuale energia mancante.
- il *Central Trigger Processor* raccoglie ed elabora le informazioni dai processori di trigger.
- il sistema TTC (*Timing Trigger Control*) genera e distribuisce i segnali di controllo.

I dati, dalle memorie *FIFO*, vengono trasferiti, tramite i *Read-Out Driver*

(ROD), nei *buffer* di *Read – Out* (ROB), ad una frequenza complessiva di ~ 15 Gbit/s, solo in presenza di un segnale di trigger di livello 1. Il sistema di trigger è diviso in regioni di interesse (*ROI*) di granularità $\sim \Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$. Ad esempio, il sistema di trigger nella regione di *barrel* è diviso in 1664 *ROI*. Ciascun ROD è progettato in funzione della regione del rivelatore che copre. La figura 1.15 mostra il percorso dei dati dal rivelatore agli elaboratori, nel caso di rivelatori *RPC*. Il trigger di livello 1 genera e trasmette al trigger di livello 2 le coordinate delle regioni *ROI* in cui si è verificato un evento interessante. In tal modo, il trigger di livello 2, accedendo solo a tali *ROI*, riduce il flusso dei dati da elaborare; inoltre,

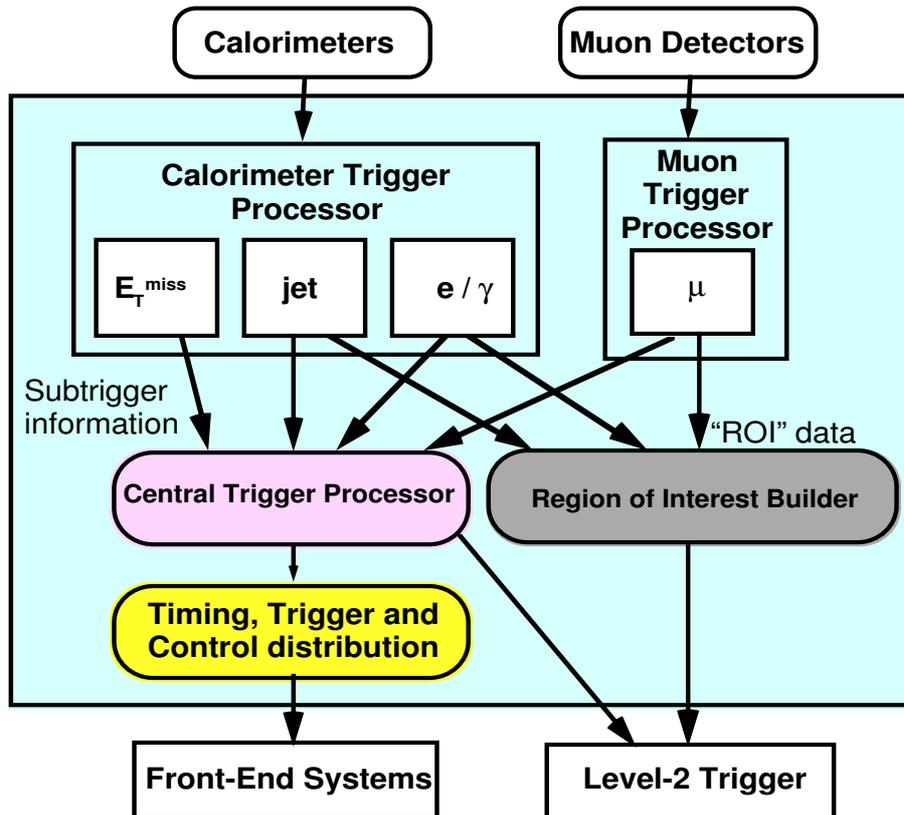


Figura 1.14 La struttura del trigger di primo livello

sebbene sia possibile accedere a tutti i dati dell'evento, sono acquisite solo le informazioni strettamente necessarie per decidere di accettare o rigettare l'evento in questione.

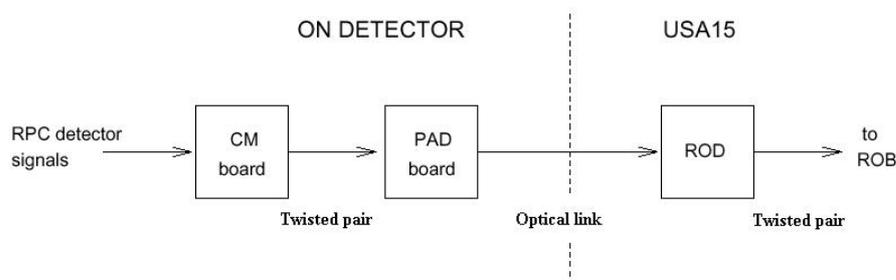


Figura 1.15 La trasmissione delle informazioni dai rivelatori RPC
alle sale di conteggio

I dati restano nei *ROB* fino a quando il trigger di livello 2 provvede a promuoverli al successivo livello di trigger, se sono dati interessanti, o ad eliminarli. Il trasferimento dei dati dai *ROB* all'*Event Filter*, che costituisce il terzo livello di trigger, è detto *event building*.

Mentre il trigger di primo livello utilizza un *hardware* appositamente progettato, sia il trigger di livello 2 che l'*Event Filter* utilizzano processori commerciali; inoltre sono usate strutture di calcolo e di comunicazione pressochè simili. Per il trigger di secondo livello c'è la necessità di avere a disposizione algoritmi semplici e veloci, per il terzo livello di trigger, invece, sono utilizzati algoritmi di elaborazione simili a quelli dell'analisi *off-line*.

Ad esempio, il decadimento del bosone di *Higgs* $H \rightarrow \gamma\gamma$, che ha una frequenza attesa di ~ 3 Hz, è individuato in eventi che hanno nello stato finale fotoni di momento trasverso di oltre 20 GeV e massa invariante oltre 60 GeV.

Il sistema di trigger di livello 2 è costituito da una *sub-farm* di processori commerciali, e la frequenza del trigger è di ~ 1 KHz. Un evento accettato al livello 2 viene ricostruito dall' *Event Filter*, che invia dati verso le memorie di massa ad una frequenza di $\sim 10 - 100$ Mbyte/s; la frequenza con cui dovranno essere prodotte informazioni dovrà essere ~ 100 Hz.

