

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

# Monitoraggio delle prestazioni del Trigger di Muoni dell'esperimento ATLAS

**Relatore:**

**Prof. Maximiliano Sioli**

**Presentata da:**

**Francesco Magnani**

**Correlatrice:**

**Dott.ssa Alessia Bruni**

Anno Accademico 2020/2021



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>iv</b>
<b>1 LHC e l'esperimento ATLAS</b>	<b>1</b>
1.1 Il Large Hadron Collider (LHC)	1
1.2 A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)	5
1.2.1 Sistema di coordinate e nomenclatura di ATLAS	7
1.2.2 Sistema dei magneti	8
1.2.3 Inner Detector	9
1.2.4 Sistema dei calorimetri	11
1.2.5 Spettrometro di Muoni	13
<b>2 Camere RPC</b>	<b>15</b>
2.1 Funzionamento di una camera RPC	15
2.2 Costituzione e geometria delle RPC	16
2.3 La nuova generazione di camere RPC: camere BI-RPC	18
<b>3 Trigger di muoni e sistema di acquisizione dati</b>	<b>20</b>
3.1 Struttura del trigger di muoni	20
3.2 Algoritmo di trigger	21
3.3 Catena di acquisizione dati e di trigger	24
3.4 Formato dei dati	27
<b>4 Monitoraggio della qualità della presa dati di ATLAS</b>	<b>30</b>
4.1 Il sistema di monitoraggio attuale di ATLAS	30
4.2 Monitoraggio della qualità della presa dati sviluppato per ATLAS	33
4.2.1 Le tipologie di errori di qualità dei dati monitorati	34
4.2.2 Gli istogrammi generati dal codice sviluppato	37
<b>Conclusione</b>	<b>43</b>
<b>Appendici</b>	<b>44</b>





# Introduzione

Lo studio dei costituenti ultimi della materia e delle leggi fondamentali che ne governano le interazioni è un compito necessario se si vuole comprendere a fondo l'origine del nostro universo. La difficoltà dello studio delle particelle si traduce nella grande complessità dei rivelatori adoperati, il cui funzionamento è costantemente monitorato.

In particolare l'esperimento ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*), condotto al CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) nell'acceleratore LHC, è un rivelatore di particelle adoperato per studiare la fisica emergente dalle collisioni protone-protone e di ioni pesanti. Risultati ottenuti con questo rivelatore sono stati la scoperta e la misura delle proprietà del bosone di Higgs, ma anche le misure di precisione del Modello Standard e la ricerca di rari (e nuovi) fenomeni fisici.

Il rivelatore ATLAS contiene più di 100 milioni di canali elettronici che forniscono la lettura dei dati ai distinti sottorivelatori che lo costituiscono. Durante il *run* (la presa dati) è necessario che i dati processati da tutti i sottorivelatori siano integralmente resi disponibili. Infatti è possibile che a seguito dell'azione della radiazione ionizzante prodotta nelle collisioni, i dati di una o più componenti elettroniche di rivelazione vengano corrotti, ovvero che la loro struttura e le informazioni contenute in essi siano modificate, alterando quindi le informazioni di fisica delle particelle rivelate. Quindi, ad ogni *run*, la qualità dei dati è costantemente monitorata da procedure automatiche che registrano contemporaneamente i parametri di funzionamento dei rivelatori e ne segnalano le eventuali anomalie, e da un gruppo di esperti che deciderà se i dati saranno utilizzabili o no per l'analisi fisica.

Il monitoraggio attuale di ATLAS, quindi, è puntuale sul singolo *run*, perciò si è voluto sviluppare un programma che invece mostrasse la frequenza degli errori tra diversi *run*, perché piccole ma frequenti frazioni di errori - sebbene apparentemente ininfluenti sulla qualità della singola acquisizione dati - potrebbero indicare la presenza di malfunzionamenti del rivelatore che nel tempo eventualmente potrebbero portare a significative perdite di dati o addirittura alla rottura delle schede elettroniche. In vista del nuovo periodo di presa dati di ATLAS dunque, l'obiettivo del lavoro di questa tesi è quello di fornire al rivelatore uno strumento aggiuntivo di monitoraggio eseguito su più *run* che permetta di visualizzare più facilmente la frequenza di alcuni degli errori più rilevanti nel causare la perdita dei dati, ovvero si è sviluppato un codice che verrà inserito in quello

degli attuali algoritmi di monitoraggio di ATLAS, che genera istogrammi in cui sono riportate le informazioni sugli errori di qualità dei dati in funzione dei *run*.

La struttura della tesi è organizzata come segue: nel Capitolo 1 si descrivono l'acceleratore LHC e l'esperimento ATLAS; il Capitolo 2 è dedicato alle camere di trigger RPC; nel Capitolo 3 si analizza in dettaglio il trigger per muoni e il sistema di acquisizione dati di ATLAS; il Capitolo 4 contiene la descrizione dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS e del nuovo codice sviluppato per le RPC; infine è presente un'appendice (Appendice A) in cui si descrivono i fenomeni fisici che intercorrono all'interno di rivelatori a gas come le camere RPC.

# Capitolo 1

## LHC e l'esperimento ATLAS

Il *Large Hadron Collider* (LHC) è l'acceleratore di particelle più grande al mondo, inoltre con il suo sistema di accelerazione permette alle particelle di raggiungere l'energia più alta mai ottenuta fino ad oggi: 13 TeV (nel centro di massa della collisione). LHC fu costruito dalla *European Organization for Nuclear Research* (CERN) tra il 1998 e il 2008 al confine tra la Svizzera e la Francia, nel sottosuolo di Ginevra, e richiede ogni anno il lavoro di migliaia di fisici, ingegneri e operai.

ATLAS è uno dei quattro esperimenti che vi sono condotti. Il suo compito è quello di eseguire misure di precisione del Modello Standard e di ricercare indizi di nuova fisica. I risultati forniti dal rivelatore ATLAS non sono sconosciuti, infatti si ricorda tra tutti la scoperta del bosone di Higgs [1], avvenuta il 4 luglio del 2012, assieme al rivelatore CMS - *Compact Muon Spectrometer*, un altro esperimento condotto al CERN.

### 1.1 Il Large Hadron Collider (LHC)

Il Large Hadron Collider (LHC) è un acceleratore di particelle che risiede ad una profondità media di 100 m nel sottosuolo ginevrino (Figura 1.1), al confine tra Francia e Svizzera, nato con l'intento di studiare i costituenti ultimi della materia e le interazioni fondamentali che li governano.

L'acceleratore è contenuto in un anello di 27 km di diametro, formato da condotti di metallo in regime di vuoto ultra elevato<sup>1</sup>, all'interno dei quali due fasci di protoni o di ioni pesanti viaggiano in direzioni opposte a velocità prossime a quella della luce, scontrandosi in soli quattro punti, in corrispondenza degli esperimenti:

- **ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)**: esperimento polivalente che ricerca indizi di nuova fisica ed esegue misure di precisione del Modello Standard;

---

<sup>1</sup>Il regime di vuoto elevato (UHV - Ultra High Vacuum) è definito come l'intervallo di pressione tra  $10^{-6}$  Pa (in Europa) o  $10^{-7}$  Pa (negli USA) sino a  $10^{-10}$  Pa.

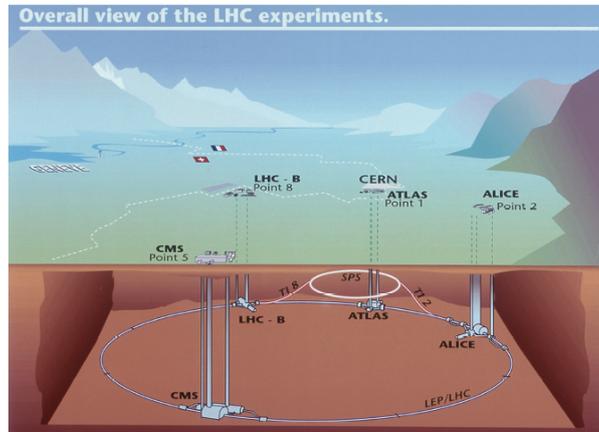


Figura 1.1: Rappresentazione pittorica del sottosuolo di Ginevra ospitante l'acceleratore LHC e i quattro esperimenti che vi risiedono.

- **CMS (Compact Muon Spectrometer)**: esperimento con gli stessi obiettivi di ATLAS ma costruito con tecnologie diverse e complementari, in modo da convalidarne o confutarne i risultati ottenuti (e viceversa);
- **ALICE (A Large Ion Collider Experiment)**: rivelatore utilizzato per studiare lo stato di plasma quark-gluonico generato dalle collisioni degli ioni;
- **LHCb (Large Hadron Collider beauty)**: esperimento specializzato nella misura e ricerca di decadimenti rari in eventi in cui è presente il quark b.

L'anello di LHC contiene decine di cavità a radiofrequenza necessarie per accelerare le particelle, migliaia di magneti superconduttori (tenuti alla temperatura di 1.9 K da un sistema di criogenia all'elio liquido) che generano un campo magnetico di  $8.4 \text{ T}^2$  per deflettere la traiettoria delle particelle, e centinaia di magneti quadrupoli che generano un campo magnetico di 6.8 T ognuno per focalizzare il fascio, evitando così che le particelle si disperdano durante il moto e vadano ad urtare la superficie interna dei condotti metallici. Inoltre, presso i punti di collisione sono installati magneti che collimano i fasci per ottenere una maggior probabilità di collisione.

Raggiungere energie dell'ordine dei TeV però, non sarebbe possibile senza un sistema di accelerazione precedente a quello contenuto nell'anello. Il sistema di creazione e accelerazione dei protoni è organizzato nel seguente modo (Figura 1.2):

- un gas di atomi di idrogeno viene fatto passare attraverso un campo elettrico che ne estrae gli elettroni, e i protoni vengono accelerati sino a un energia di 50 MeV dall'acceleratore lineare LINAC2 (LInear ACcelerator);

---

<sup>2</sup>Si confronti il campo magnetico terrestre, che sulla superficie varia nell'intervallo  $25 \div 65 \mu\text{T}$  ( $0.25 \div 0.65 \text{ G}$ ).

- i protoni così generati attraversano una triade di sincrotroni:
  - *Proton Synchrotron Booster* (PSB): accelera i protoni fino a 1.4 GeV;
  - *Proton Synchrotron* (PS): accelera i protoni fino a 25 GeV;
  - *Super Proton Synchrotron* (SPS): accelera i protoni fino a 450 GeV;
- infine i protoni giungono all'anello LHC, ove raggiungono un'energia massima di 14 TeV nel centro di massa della collisione.

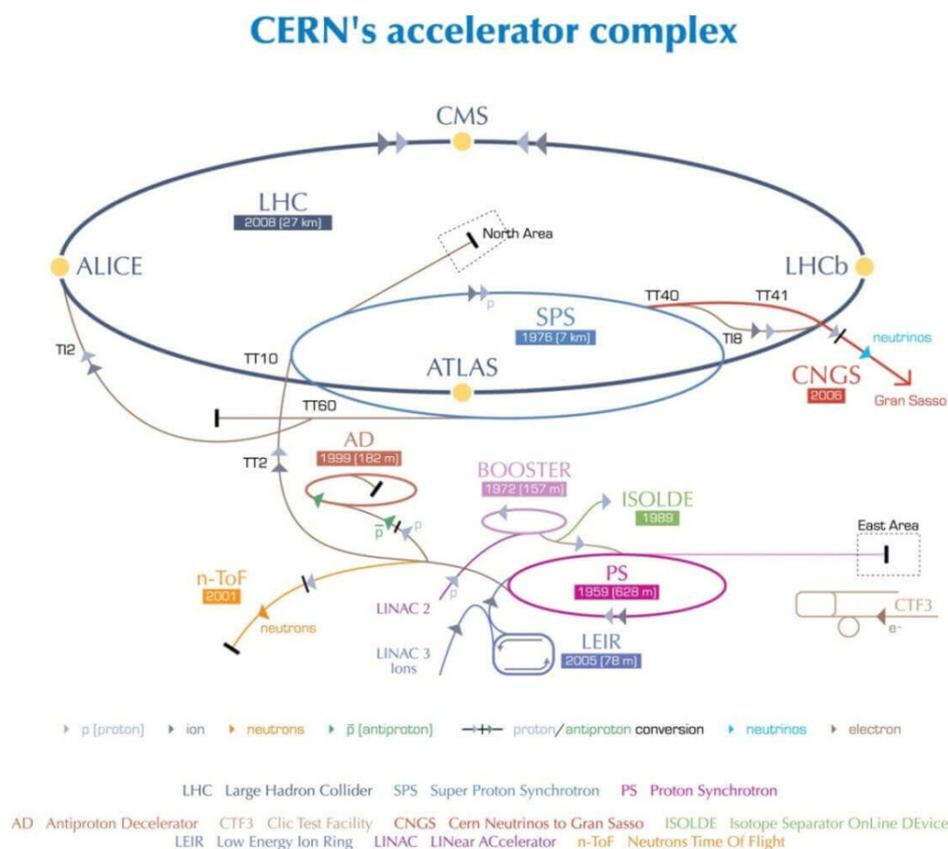


Figura 1.2: Complesso degli acceleratori e degli esperimenti del CERN.

Nell'ultima presa dati di LHC, chiamata *Run-2*, si sono accelerati fasci di protoni strutturati in pacchetti di particelle distanziati ogni 25 ns fino a 6.5 TeV, producendo collisioni nel centro di massa pari a 13 TeV, al picco di luminosità<sup>3</sup> massima istantanea di  $5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , come mostrato in Tabella 1.1.

<sup>3</sup>La **luminosità**  $L = \frac{1}{\sigma} \frac{dN}{dt}$  è il numero di particelle (o *eventi*) rivelate a un certo tempo  $t$  sulla sezione d'urto  $\sigma$ , espresso nel sistema *cgs* (centimetre-gram-second).  $L$  è quindi un parametro che dipende fortemente dalle proprietà del fascio delle particelle, come la larghezza, ma anche dalle proprietà del target, come la sua dimensione e la sua densità.

Parametro	2012	2015 ( <i>Run-2</i> )	Valore di design
Energia del fascio (TeV)	4	6.5	7
Intervallo bunch (ns)	50	25	25
Numero massimo di bunch	1380	2244	2808
Protoni per bunch	$1.7 \times 10^{11}$	$1.15 \times 10^{11}$	$1.15 \times 10^{11}$
Picco luminosità ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$7.7 \times 10^{33}$	$5 \times 10^{33}$	$1 \times 10^{34}$

Tabella 1.1: *Panoramica dei parametri caratteristici di LHC durante gli ultimi run. Le quantità nell'ultima colonna descrivono i valori massimi raggiungibili dall'attuale configurazione.*

## L'Upgrade di LHC

Attualmente sono in corso alcune modifiche dell'apparato di LHC previste dal piano di *upgrade* che è stato stilato per l'acceleratore, che prima dell'inizio del *Run 3* (Figura 1.3) verrà trasformato in quello che si chiamerà **High-Luminosity LHC (HL-LHC)**, ovvero un acceleratore di particelle alla luminosità istantanea di  $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . L'obiettivo finale però è più ambizioso e consiste nel raggiungere una luminosità

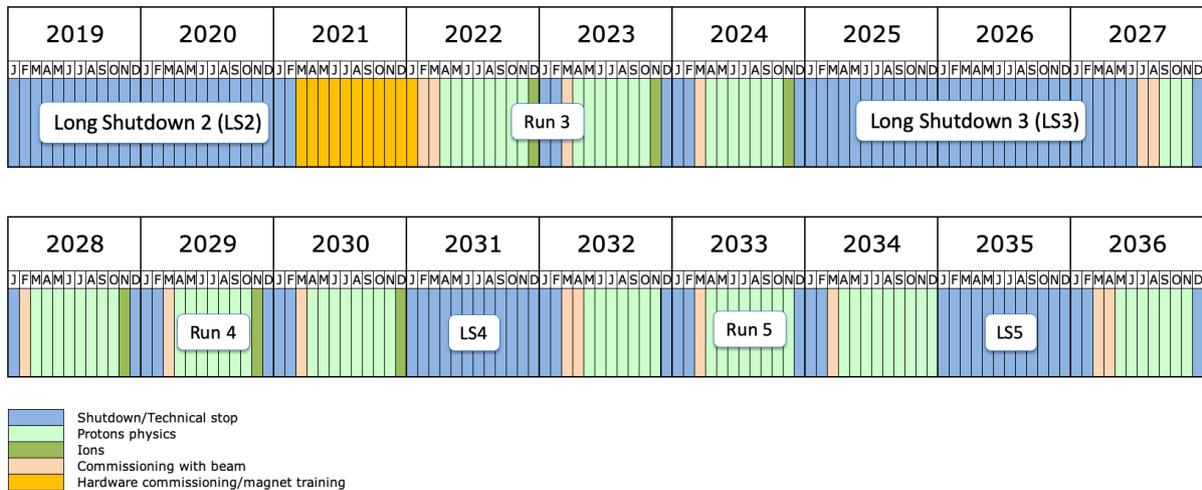


Figura 1.3: *schedule a lungo termine degli interventi di LHC*

di  $5\text{-}7 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  tra il 2035 e il 2040<sup>4</sup>.

L'ultima run eseguita a LHC (*Run 2*) si è svolta a un picco di luminosità di  $5 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , questo vuol dire che l'aumento di luminosità cui andrà incontro l'intero sistema LHC sarà di un ordine di grandezza superiore.

<sup>4</sup>A causa dell'emergenza sanitaria di interesse internazionale provocata dal virus Covid-19, le scadenze e le date di intervento potrebbero aver subito qualche variazione

L'incremento della luminosità comporterà un aumento dei prodotti di collisioni protoniche che permetteranno di studiare a fondo alcuni fenomeni ritenuti di fondamentale importanza nel mondo della Fisica delle Particelle, quale ad esempio la rottura della simmetria da parte della forza elettrodebole, e che permetteranno di indagare più a fondo l'entità della fisica oltre il Modello Standard.

L'aumento della luminosità di quasi un ordine di grandezza però non è sostenibile da tutte le componenti elettroniche dell'attuale apparato strumentale di ATLAS che quindi andrà incontro ad alcune modifiche (descritte nei Paragrafi 1.2.5, 2.3 e 3.2).

## 1.2 A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)

ATLAS è un rivelatore polivalente a geometria cilindrica [2] che rivela i prodotti delle collisioni ad alta energia di protoni o ioni pesanti generati nell'intero angolo solido attorno al punto di collisione. Il rivelatore è mostrato in Figura 1.4, ed è composto da una regione a forma di barile (*barrel section*) e due regioni che ne costituiscono le due basi (*end-cap sections*). L'intera struttura è costituita da diversi apparati di rivelazione

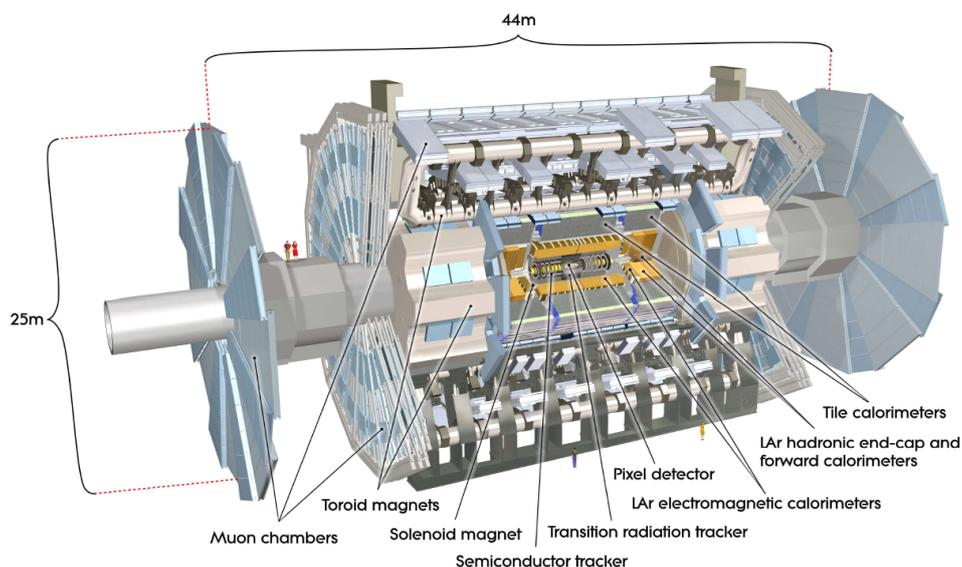


Figura 1.4: Spaccato del rivelatore ATLAS, ove si osservano tutti i diversi livelli in cui sono disposti i rivelatori, e le dimensioni geometriche dell'intero apparato.

posizionati attorno al punto di collisione, dal più interno al più esterno: *inner detector*, calorimetri elettromagnetici, calorimetri adronici, spettrometro di muoni. I calorimetri e lo spettrometro di muoni contengono anche un livello hardware di trigger, che si occupa di selezionare gli eventi di maggior interesse emergenti dal punto di collisione per l'analisi

offline. Le caratteristiche principali del generatore sono elencate in Tabella 1.2.

La frequenza delle collisioni protone-protone alla luminosità di  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  è di

Componenti del rivelatore	Risoluzioni	Pseudorapidità $\eta$	
		Misura	Trigger
<b>Inner Detector</b>	$\sigma_{p_T}/p_T = 0.05\% p_T \oplus 1\%$	$\pm 2.5$	
<b>Calorimetri EM</b>	$\sigma_E/E = 10\%\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	$\pm 3.2$	$\pm 2.5$
<b>Calorimetri adronici</b>			
Barrel ed end-cap	$\sigma_E/E = 50\%\sqrt{E} \oplus 3\%$	$\pm 3.2$	$\pm 3.2$
Forward	$\sigma_E/E = 100\%\sqrt{E} \oplus 10\%$	$3.1 <  \eta  < 4.9$	$3.1 <  \eta  < 4.9$
<b>Spettrometro di muoni</b>	$\sigma_{p_T}/p_T = 10\% p_T = 1 \text{ TeV}$	$\pm 2.7$	$\pm 2.4$

Tabella 1.2: *Caratteristiche generali del rivelatore ATLAS. Il simbolo  $\oplus$  indica una somma in quadratura nel caso di grandezze fisiche indipendenti. Quando non indicato, l'energia  $E$  e l'impulso trasverso  $p_T$  sono espressi in GeV.*

circa 1 GHz, ma non tutti gli eventi emergenti vengono registrati, perciò il sistema di trigger seleziona solamente quelli di maggiore interesse. Il sistema di trigger è diviso in due livelli: *Level-1 trigger* (L1), e un filtro chiamato *High-Level Trigger* (HLT). L1 è il livello hardware di trigger e utilizza camere RPC - *Resistive Plate Chambers* per identificare muoni nella regione *barrel*, mentre camere TGC - *Thin Gap Chambers* vengono impiegate negli *end-caps*. L'intero funzionamento del trigger verrà approfondito nel Capitolo 3.

ATLAS continua a raccogliere dati sin dal completamento della sua installazione nel 2008 ed è previsto che continui ad operare sino al 2040, subendo miglioramenti che lo renderanno sempre efficiente nel corso dell'evoluzione dell'elettronica e sostituiranno le componenti che avranno presentato effetti di invecchiamento. In particolare, a seguito degli interventi previsti dal piano di *upgrade* di LHC, anche ATLAS andrà in contro ad alcune modifiche, che sono previste in due fasi diverse: la prima (*Upgrade di Fase I*) è già in corso e riguarda l'inserimento di nuove camere di rivelazione e di trigger che verranno descritte nei Paragrafi 1.2.5 e 2.3; la seconda (*Upgrade di fase 2*) sarà portata a termine entro l'inizio del *Run4* e consiste nella modifica dell'attuale sistema di trigger, ed è descritta nel Paragrafo 3.2.

Alcuni esempi di risultati ottenuti con l'esperimento ATLAS sono stati pubblicati dalla Collaborazione ATLAS e includono: la scoperta del Bosone di Higgs [1] e la misura delle sue proprietà [3–5], la ricerca di nuova fisica [6–8], e le misure di precisione del Modello Standard delle particelle [9–13].

### 1.2.1 Sistema di coordinate e nomenclatura di ATLAS

ATLAS utilizza un sistema di riferimento destrorso con origine fissata nel punto di collisione al centro del rivelatore. L'asse  $z$  è orientato lungo la direzione dei fasci, l'asse  $x$  punta verso il centro dell'anello LHC, mentre l'asse  $y$  è rivolto verso l'alto. Il sistema di coordinate utilizzato è un sistema di coordinate sferiche  $(r, \phi, \theta)$ , con  $\phi$  angolo azimutale del piano  $x-y$  perpendicolare all'asse  $z$ ,  $\theta$  angolo polare definito nel piano  $y-z$ .

Si definisce la grandezza fisica **rapidità**:

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{(E + p_z)}{(E - p_z)}$$

che per particelle con massa tendente a zero si può approssimare con la **pseudorapidità**:

$$\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$$

Infine è utile introdurre la distanza angolare  $\Delta R = \sqrt{(\Delta\eta)^2 + (\Delta\phi)^2}$ , definita nel piano  $\eta - \phi$ .

Per identificare gli elementi e le regioni dello spettrometro di muoni viene utilizzata la seguente nomenclatura. ATLAS è diviso in due metà lungo l'asse  $z$ , chiamate *side A* ( $z > 0$ ) e *side C* ( $z < 0$ ). La sezione di *barrel* è identificata mediante la lettera 'B', mentre le end-cap sections con 'E'. Le lettere 'I' (inner), 'M' (middle) e 'O' (outer) sono utilizzate per identificare i corrispondenti livelli dello spettrometro di muoni, dal più interno al più esterno. Le lettere 'S' e 'L' specificano se una camera appartiene a un settore piccolo (*small*) o grande (*large*). Ad esempio, la nomenclatura ATLAS per una camera posizionata in un settore grande del livello centrale in barrel è: *BML*, seguita dall'indice di posizione della camera lungo l'asse  $z$  (da 1 a 8), la lettera *A* o *C*, e il numero di settore azimutale (da 1 a 16). La geometria della sezione *barrel* e degli *end-caps* può essere visualizzata in Figura 1.5.

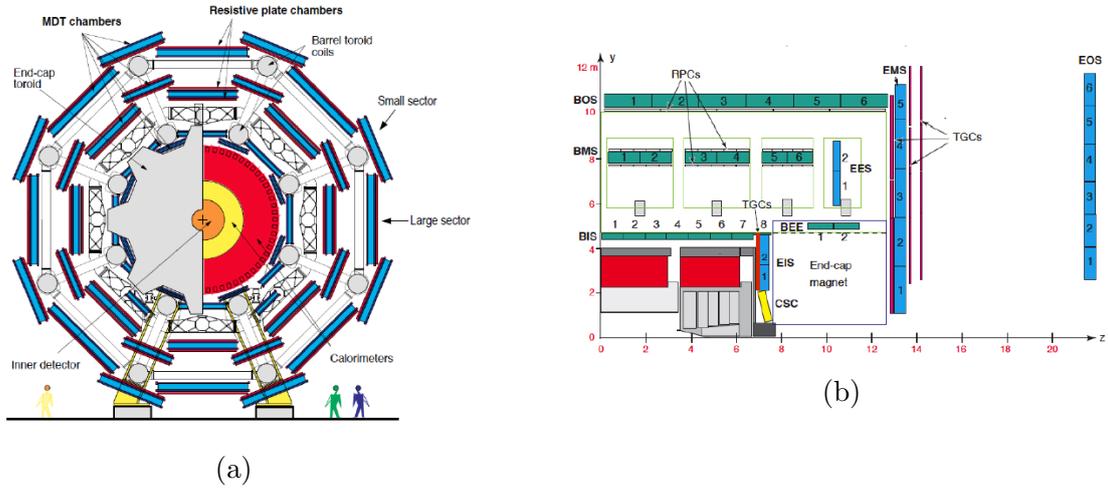


Figura 1.5: (a) Spaccato del rivelatore in cui si mostra il piano perpendicolare alla direzione del fascio (piano  $x-y$ ); (b) vista nel piano  $y-z$  con una parte della regione barrel e un end-cap.

## 1.2.2 Sistema dei magneti

ATLAS è provvisto di un potente sistema di quattro magneti superconduttori, con un'energia totale immagazzinata di 1.6 GJ. La Figura 1.6 mostra il layout generale del rivelatore con la sua caratteristica forma cilindrica, le sezioni in cui è diviso, e i quattro magneti superconduttori.

Il sistema dei magneti di ATLAS è costituito da:

- un **magnete solenooidale** lungo 5.3 m e di 2.5 m di diametro allineato all'asse dei fasci protonici, che genera un campo magnetico (lungo  $z$ ) di 2 T per l'*inner detector*;
- un **sistema di magneti toroidali**, costituito da otto magneti toroidali nella sezione *barrel*, e due magneti toroidali negli *end-caps*, il cui compito è quello di deviare le particelle verso i rivelatori.

Gli otto magneti in *barrel* formano una struttura lunga 25.3 m e di diametri interno ed esterno di 9.4 m e 20.1 m, rispettivamente. Essi generano un campo magnetico non uniforme nella regione  $|\eta| < 1.05$  (regione *barrel*), con un *bending power*<sup>5</sup> che va da 1.5 Tm fino a 5.5 Tm.

I magneti negli *end-caps* generano il campo magnetico negli intervalli  $1.6 < |\eta| < 2.7$  (*end-caps*), con un *bending power* che va da 1 Tm fino a 7.5 Tm.

<sup>5</sup>Il *bending power* è l'integrale della componente del campo magnetico perpendicolare alla traiettoria della particella, lungo un percorso:  $\Xi = \int_0^L (\vec{B} \times \hat{v}) \cdot d\vec{l}$

Nella cosiddetta *regione di transizione* ( $1.4 < |\eta| < 1.6$ ) la deflessione è garantita dalla sovrapposizione dei magneti di *barrel* e di *end-caps*, poiché gli ultimi sono inclinati di  $22.5^\circ$  rispetto ai primi.

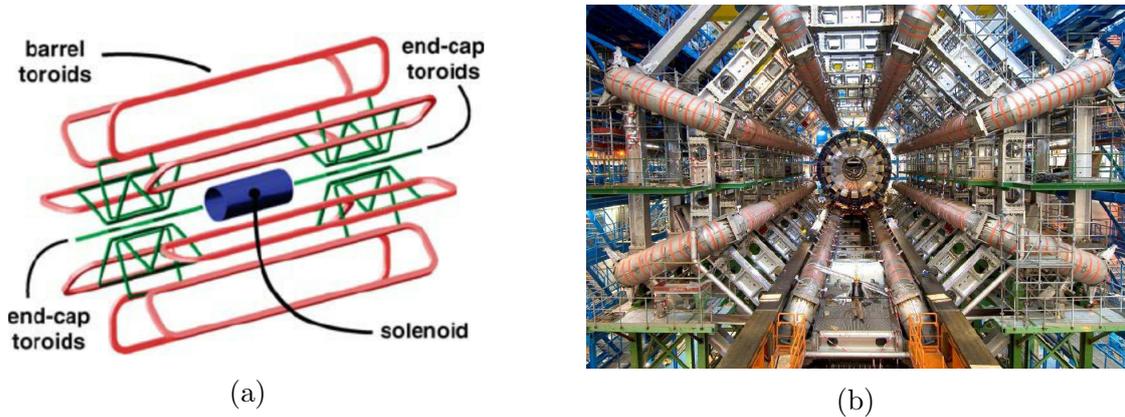


Figura 1.6: (a) Geometria del sistema di magneti di ATLAS. Si osserva il magnete solenoidale al centro, le otto bobine toroidali in barrel, e le bobine in end-cap; (b) fotografia delle otto bobine toroidali di barrel durante il loro montaggio nel supporto.

### 1.2.3 Inner Detector

Posizionato nella parte più interna del rivelatore ATLAS, l'*inner detector*, immerso in un campo magnetico di 2 T generato dal magnete solenoidale che lo avvolge, è il cuore del rivelatore. Il suo compito è quello di ricostruire i vertici primari e secondari e di misurare l'impulso trasverso delle particelle cariche nell'intervallo di pseudorapidità  $|\eta| < 2.5$ . L'*inner detector* è formato da tre rivelatori: *Pixel Detector*, *Semi-Conductor Tracker* (SCT), e *Transition Radiation Tracker* (TRT). Nella sezione *barrel* i tre rivelatori sono disposti in livelli cilindrici concentrici attorno al punto di collisione, mentre negli *end-caps* sono localizzati su dischi ortogonali al fascio (Figura 1.7). L'intero apparato strumentale dell'*inner detector* (specialmente quello dei rivelatori più interni) deve essere resistente all'elevata dose di radiazioni che assorbe durante il funzionamento, dato che si trova molto vicino al punto di collisione dei fasci.

#### Pixel detector

I sensori del pixel detector sono spessi  $250 \mu\text{m}$  per un totale di oltre 80 milioni di pixel di dimensioni pari a  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ . Sono installati su tre livelli di profondità (tre dischi) in sezione *barrel* (*end-caps*), e hanno accuratèzze pari a  $10 \mu\text{m}$  (piano  $R - \phi$ ) e  $75 \mu\text{m}$  (lungo  $z$ ) in *barrel*, mentre  $10 \mu\text{m}$  (piano  $R - \phi$ ) e  $115 \mu\text{m}$  ( $R$ ) negli *end-caps*.

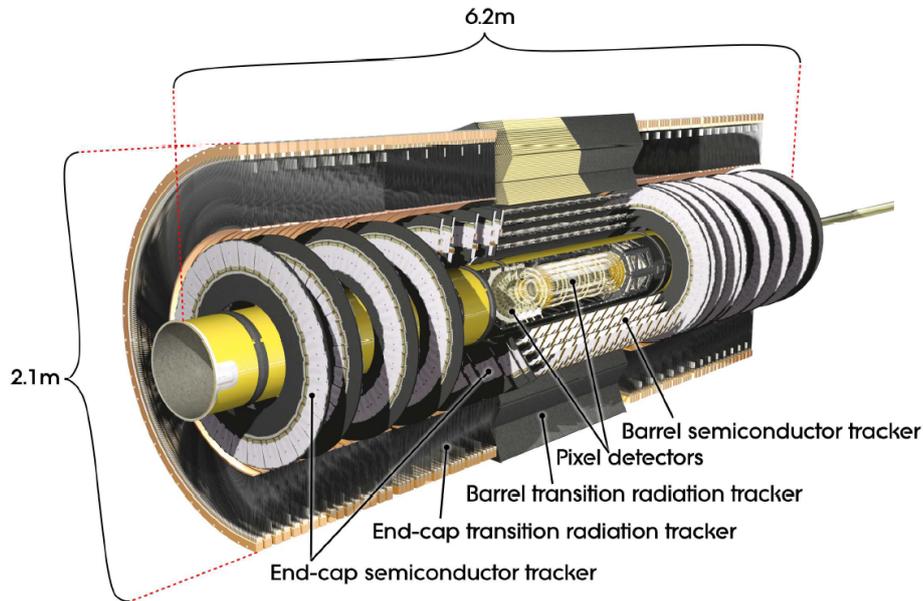


Figura 1.7: Spaccato dell'inner detector di ATLAS.

## Semi-Conductor Tracker

SCT è un tracciatore con più di 6 milioni di *microstrip* di silicio installate a un passo di  $80 \mu\text{m}$  e con spessore di circa  $285 \mu\text{m}$ . Le *microstrip* sono distribuite in 8 livelli, ognuno con accuratze  $17 \mu\text{m}$  (piano  $R - \phi$ ) e  $580 \mu\text{m}$  ( $z$ ) in *barrel*, e analogamente  $17 \mu\text{m}$  (piano  $R - \phi$ ) e  $580 \mu\text{m}$  ( $R$ ) negli *end-caps*.

## Transition Radiation Tracker

Il TRT è formato da 73 livelli (*barrel*) e 160 piani (*end-caps*) di camere a deriva (*drift tubes*) intervallate da piani di polipropilene, che rivelano il passaggio delle particelle cariche con impulso trasverso  $p_T > 0.5 \text{ GeV}$ . Le camere a deriva sono tubi di 4 mm di diametro con al centro un filo di tungsteno di  $31 \mu\text{m}$  di diametro. Ogni camera fornisce una risoluzione spaziale di  $130 \mu\text{m}$ , con resistenza offerta dal filo (anodo) di circa  $60 \Omega/\text{m}$ , e resistenza del tubo (catodo) inferiore a  $300 \Omega/\text{m}$ . I tubi sono riempiti di una miscela di gas costituita al 70% da Xenon, che al passaggio di una particella carica viene ionizzato. Successivamente, a causa della differenza di potenziale tra catodo e anodo, gli elettroni prodotti dalla ionizzazione del gas vengono attratti verso il filo, mentre gli ioni positivi verso la superficie del tubo, generando così una corrente elettrica misurabile. La risoluzione delle misure delle tracce con l'intero apparato TRT è di  $170 \mu\text{m}$ , sicuramente inferiore rispetto a quella dei pixel detector o del tracciatore SCT, ma comunque di

grande utilità per coprire una regione di rivelazione maggiore.

## 1.2.4 Sistema dei calorimetri

All'esterno dell'inner detector e del magnete solenoidale che lo avvolge, si trova il sistema dei calorimetri (Figura 1.8), che deve fornire misure di precisione dell'energia dei fotoni, jets, protoni e neutroni passanti. I calorimetri più vicini al punto di collisione sono

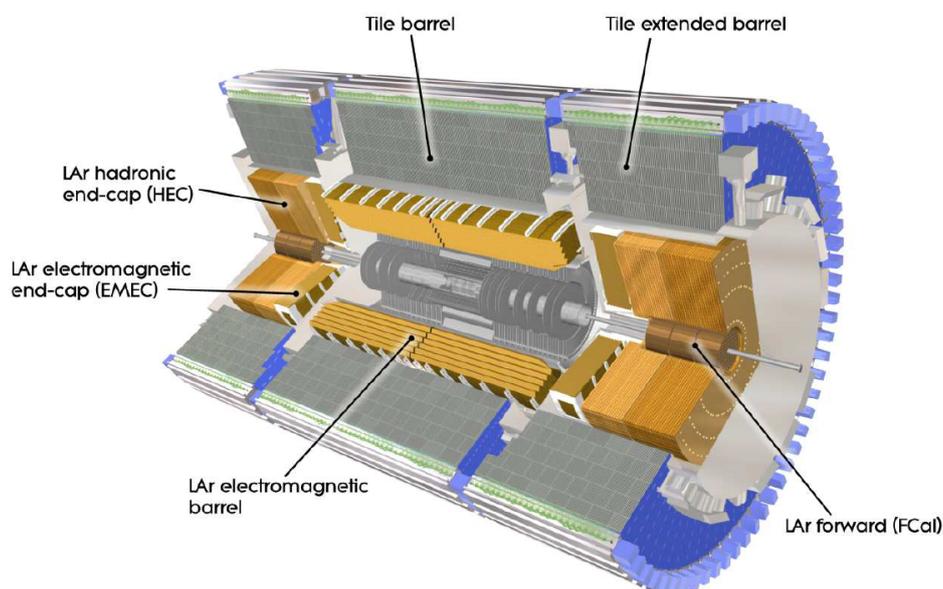


Figura 1.8: Spaccato del sistema dei calorimetri di ATLAS.

contenuti in tre criostati: uno nella *sezione barrel* e due negli *end-caps*. Il criostato in *barrel* contiene un calorimetro elettromagnetico, mentre i due negli *end-caps* contengono ognuno un calorimetro elettromagnetico EMEC (*Electromagnetic End-cap Calorimeter*), un calorimetro adronico HEC (*Hadronic End-Cap calorimeter*) posizionato dietro all'EMEC, e un calorimetro FCal (*Forward Calorimeter*). I calorimetri FCal sono utilizzati per la misura di entrambe le energie: elettromagnetiche e adroniche. Tutti i calorimetri installati utilizzano argon liquido come mezzo di rivelazione, tranne il calorimetro adronico posizionato nella sezione barrel, esterno a quello elettromagnetico, il quale utilizza scintillatori. Con l'ausilio degli FCal, la copertura di rivelazione totale ottenuta dal sistema di calorimetri è  $|\eta| < 4.9$ .

### Calorimetri elettromagnetici

Il compito dei calorimetri elettromagnetici è quello di misurare l'energia delle particelle elettricamente cariche e dei fotoni che interagiscono elettromagneticamente con il materiale del rivelatore. Il sistema che assorbe (assorbitori) l'energia delle particelle interagenti, e che ne ferma dunque il moto, è costituito da piastre di piombo di spessore medio di 1.34 mm in *barrel*, e circa 2 mm negli *end-caps*, mentre l'argon liquido è il mezzo impiegato per la misura dell'energia rilasciata. Nella regione di *barrel* sono presenti tre livelli di profondità per la rivelazione delle particelle. Il primo livello è quello con maggiore granularità e quindi più preciso, con strip di silicio lungo la direzione del fascio, mentre gli altri due vengono impiegati per accertare e migliorare le misurazioni eseguite col primo. Nelle sezioni *end-cap* invece, i calorimetri elettromagnetici sono costituiti da assorbitori con spessore medio di circa 2 mm, installati su due ruote perpendicolari alla direzione del fascio, e coprono la regione  $1.375 < |\eta| < 3.2$ . Inoltre, per migliorare ulteriormente la misura dell'energia è implementato un pre-campionatore all'argon liquido nelle regioni  $0 < |\eta| < 1.8$  (*barrel*) e  $1.5 < |\eta| < 1.8$  (*end-caps*). I pre-campionatori forniscono la misura dell'energia persa di fronte ai calorimetri elettromagnetici e dentro al criostato che li contiene.

## Calorimetri Adronici

I calorimetri adronici si occupano di misurare l'energia delle particelle che interagiscono fortemente (principalmente adroni), e che quindi oltrepassano il sistema di calorimetri elettromagnetici. I calorimetri adronici sono di tre tipi: calorimetro a scintillatori (*barrel*), calorimetro ad argon liquido nella sezione di *end-cap*, e calorimetro ad argon liquido nella sezione *forward*. Il primo utilizza l'acciaio come mezzo assorbitore e scintillatori per la rilevazione dell'energia, copre la regione  $|\eta| < 1.7$  ed è posizionato immediatamente dietro al calorimetro elettromagnetico. Gli scintillatori utilizzati sono spessi 3 mm, ma hanno dimensioni diverse a seconda del livello di profondità in cui sono posizionati (la dimensione lungo  $z$  varia da 97 a 187 mm, mentre quella lungo il piano azimutale tra 200 e 400 mm). I calorimetri in *end-cap* (HEC) invece, utilizzano rame e argon liquido come mezzo di campionamento, e coprono il range  $1.5 < |\eta| < 3.2$ . Le dimensioni delle celle degli HEC in termini di angolo azimutale coperto e pseudorapidità sono  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$  per  $\eta < 2.5$ , e  $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.2 \times 0.2$  oltre. Infine i calorimetri adronici condividono gli stessi due criostati che contengono anche i calorimetri elettromagnetici EMEC e gli FCal, nella regione *end-cap*. Questo compatto design di costruzione permette di minimizzare l'energia persa tra i calorimetri, e inoltre di limitare gli eventi di background che raggiungono il sistema di rivelazione dei muoni.

## 1.2.5 Spettrometro di Muoni

Lo spettrometro di muoni costituisce la parte più esterna del rivelatore ATLAS (Figura 1.9) ed è realizzato per rivelare muoni altamente penetranti e misurarne l'impulso trasverso nell'intervallo di pseudorapidità  $|\eta| < 2.7$ . Esso è formato da tre regioni: regione *barrel* ( $|\eta| < 1.05$ ), regioni *end-cap* ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ ) e regioni *forward* ( $2 < |\eta| < 2.7$ ), che sono suddivise in otto ottanti nella direzione azimutale (Figura 1.5a), ognuno contenente un settore grande e uno piccolo leggermente sovrapposti (per migliorare la copertura geometrica del rivelatore), nei quali sono installate le camere di rivelazione e di trigger. Il compito delle camere di trigger è quello di identificare i muoni e verrà

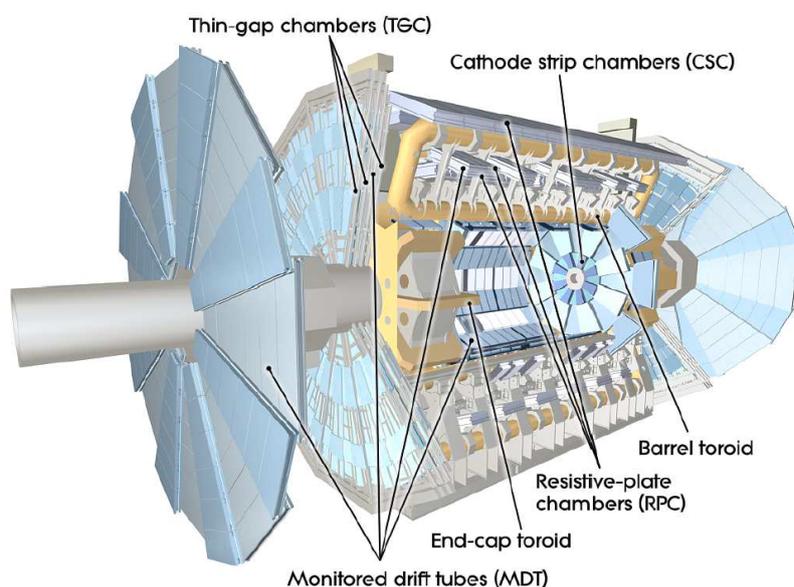


Figura 1.9: Spaccato del sistema di rivelazione dei muoni di ATLAS

descritto approfonditamente nel Capitolo 3.

### Regione *barrel* ( $|\eta| < 1.05$ )

Nella regione *barrel* il campo magnetico è fornito da otto bobine di magneti toroidali superconduttori a simmetria- $\phi$  che deviano le particelle per permetterne la rivelazione (Paragrafo 1.2.2). Le camere sono posizionate in tre livelli cilindrici attorno all'asse del fascio di protoni, a distanze: 5 m, 7.5 m e 10 m.

Le camere di precisione presenti in regione *barrel* sono camere MDT - *Monitored Drift Tube* e forniscono la misura dell'impulso trasverso delle particelle. Le MDT sono camere a deriva costituite da un sistema di tre fino a otto livelli di tubi di deriva, che al loro

interno contengono un filo anodico immerso in una miscela gassosa di argon e anidride carbonica a una pressione di 3 bar. La risoluzione di una camera MDT è di circa  $35 \mu\text{m}$  ( $80 \mu\text{m}$  per singolo tubo di deriva).

Le camere di trigger utilizzate in regione *barrel* sono le RPC - *Resistive Plate Chambers*, veloci camere capaci di inviare informazioni sulle tracce dei muoni in un tempo dell'ordine di decine di nanosecondi dal loro passaggio. Le RPC misurano entrambe le coordinate  $\eta$  e  $\phi$  delle tracce ed eseguono un algoritmo per identificare gli eventi di interesse. Le camere RPC e il sistema di trigger verranno discussi in dettaglio nel Capitolo 2 e nel Capitolo 3, rispettivamente.

### **Regioni *end-cap* ( $1.05 < |\eta| < 2.4$ )**

Nelle regioni *end-cap* le camere sono installate perpendicolarmente al fascio di particelle su larghe strutture a disco montate dietro i magneti toroidali, a distanze  $|z| \sim 7.4 \text{ m}, 10.8 \text{ m}, 14 \text{ m}, 21.5 \text{ m}$  dal punto di collisione. Le camere di precisione degli *end-caps* sono ancora una volta le MDT, ma le camere di trigger sono le TGC - *Thin Gap Chambers*, che non sono discusse in questa tesi.

### **Regioni *forward* ( $2 < |\eta| < 2.7$ )**

Nelle regioni *forward* oltre alle camere MDT vengono utilizzate anche le CSC - *Cathode-Strip Chambers* per la loro maggiore granularità, che si traduce in un'ottima risoluzione spaziale e temporale. Le CSC sono camere a multifili costituite da piani di catodi segmentati in *strip* posizionate in direzioni ortogonali, che permettono la misura di entrambe le coordinate  $\eta$  e  $\phi$ . Il loro funzionamento è simile a quello delle MDT, ma hanno una risoluzione di  $40 \mu\text{m}$  nel piano- $\eta$ , e di  $5 \text{ mm}$  nel piano trasversale ( $\phi$ ).

A settembre 2021 è iniziata l'operazione di sostituzione delle strutture a disco che contengono le camere MDT e CSC (*Small Wheels*) con le nuove strutture a disco (*New Small Wheels*) contenenti sTGC - *small-strip TGC* e MM - *Micro-Mesh Gaseous Structure* (camere di precisione e di trigger), che è già stata completata in *Side A* ( $z > 0$ ) mentre in *Side C* ( $z < 0$ ) è in via di completamento. La sostituzione fa parte degli interventi di *upgrade* che coinvolge l'apparato elettronico di ATLAS nell'adattamento al futuro acceleratore HL-LHC.

# Capitolo 2

## Camere RPC

Le camere RPC (*Resistive Plate Chambers*) impiegate in ATLAS sono rivelatori a gas a piani paralleli costituite da elettrodi ad alta resistività tra cui è contenuta una miscela di gas, che rivelano i muoni ed eseguono algoritmi di trigger in breve tempo fornendo un'efficienza di oltre il 98% (in presenza di un flusso di particelle dell'ordine del  $\text{kHz}/\text{cm}^2$ ). Inoltre sono camere robuste e più semplici da costruire rispetto ad altre tecnologie, il che le rende anche economicamente vantaggiose.

Nei prossimi paragrafi si discute il funzionamento delle RPC (2.1), la costituzione e la geometria di installazione delle RPC in ATLAS (2.2) e la struttura della RPC di nuova generazione (2.3), mentre i fenomeni fisici che avvengono all'interno della camera sono descritti in Appendice A.

### 2.1 Funzionamento di una camera RPC

In fisica delle particelle le camere RPC sono utilizzate in regime di valanga o di *streamer*, ma per applicazioni ad alti flussi di particelle è preferito il regime di valanga perché contribuisce in minore quantità all'effetto di *ageing* (invecchiamento) delle camere, garantendone quindi una maggior durata. Inoltre, la fisica che descrive il funzionamento del regime di valanga è simulabile, quindi è possibile eseguire dettagliate simulazioni dei processi che avvengono all'interno delle RPC [14], mentre il regime di *streamer* è più complesso da modellizzare. Le RPC in ATLAS dunque funzionano in regime di valanga, in cui avvengono i fenomeni di ionizzazione del gas, di produzione di coppie e gli effetti *bremstrahlung*, Compton e Rayleigh (Appendice A), anche se il fenomeno di ionizzazione è il più rilevante ai fini della creazione del segnale elettrico. In particolare, successivamente alla ionizzazione del gas, le cariche elettriche liberate vengono raccolte dagli elettrodi, per poi decadere nel tempo secondo legge esponenziale. Quindi la camera RPC istantaneamente presenta un *punto cieco locale* in corrispondenza dell'accumulo di carica, ma sul resto della superficie rimane sensibile alle particelle. Successivamente il

segnale è letto mediante accoppiamento capacitivo tra gli elettrodi e le *strip* che sono montate sulle superfici esterne, viene poi raccolto dall'elettronica di *front-end* delle camere e di seguito in cascata dalle diverse schede elettroniche della catena di acquisizione descritta nel Capitolo 3. Il segnale prodotto da una RPC ha una larghezza di 5 ns e un *jitter* (*delay*, ritardo) di 1.5 ns. Tuttavia il *delay* di 1.5 ns non rappresenta un problema ai fini del funzionamento della camera e delle applicazioni di trigger. Un tipico segnale generato su una *strip* è riferito come *hit*. Tutti gli *hit* entro la finestra temporale di 200 ns, centrata sul *bunch-crossing* selezionato dal sistema di trigger, vengono registrati per l'analisi *offline*. Dopo aver registrato un *hit* in un canale (collegato alla *strip* colpita) viene impostata una finestra temporale di *dead-time* di 100 ns per quel canale, durante il quale sarà inutilizzabile per la rivelazione di altre particelle penetranti.

Essendo camere rapide ed avendo un'ottima risoluzione temporale, le RPC vengono utilizzate per la misurazione di entrambe le coordinate  $\eta$  e  $\phi$  dei muoni, per la misurazione del ToF (*Time-of-Flight*) e per il trigger in regione *barrel*.

## 2.2 Costituzione e geometria delle RPC

Gli RPC sono rivelatori a gas utilizzati nella sezione *barrel* dello spettrometro di muoni di ATLAS, in una struttura che li vede accoppiati con le camere MDT precedentemente descritte (Paragrafo 1.2.5). In ATLAS operano in un campo magnetico di circa 0.5 T, sono equipaggiate da *strip* ed elettronica di *readout* che permettono di raggiungere una risoluzione spazio-temporale dell'ordine del 1 cm  $\times$  1 ns [2] e misurano entrambe le coordinate  $\eta$  e  $\phi$  dei muoni.

Ogni camera RPC è composta da due rivelatori rettangolari contigui (chiamati *unità*), sovrapposti di 65 mm per massimizzare la copertura geometrica. Ogni unità consiste in due livelli di rivelazione indipendenti sovrapposti ai quali ci si riferisce col termine *doppietto*. Una o due unità di RPC integrate assieme a camere MDT formano una *stazione di muoni*.

### Struttura interna

Ogni camera RPC è costituita da due elettrodi (catodo e anodo) di *High Pressure Laminate* - HPL ad alta resistività pari a circa  $10^{10} \Omega\text{cm}^1$ . Gli elettrodi sono spessi 1.8 mm (1.2 mm nelle nuove RPC descritte nel Paragrafo 2.3) e sono tenuti paralleli a una distanza (*gas gap*) di 2 mm (1 mm nelle nuove RPC) da distanziatori di policarbonato (isolante termico) posizionati ogni 10 cm di distanza. I distanziatori coprono approssimativamente l'1% della superficie della camera, quindi ne decrescono

---

<sup>1</sup>L'elevata resistività previene la generazione di scariche limitando la carica accumulata sugli elettrodi.

l'efficienza di un pari ammontare.

Gli elettrodi, sulle cui superfici è applicato un sottile strato di olio di semi di lino per migliorarne la levigatezza, sono tenuti a una differenza di potenziale di riferimento di 9.6 kV (5.4 kV nelle nuove RPC). In realtà, la tensione efficace applicata tra di essi ad ogni istante è continuamente corretta (con correzioni di un centinaio di volt) in accordo con le continue variazioni di temperatura e pressione che avvengono nei pressi delle camere, in modo tale da garantire un'efficienza di rivelazione delle RPC pari a quella ottenuta alla temperatura di 24 °C e pressione 970 mbar.

Lo spazio tra i due elettrodi viene continuamente riempito di una miscela di gas  $C_2H_2F_4$ (94.7%) –  $C_4H_{10}$ (5%) –  $SF_6$ (0.3%), contenente un componente "estintore" ( $C_4H_{10}$ ) che proibisce la propagazione delle scariche elettriche, e un componente elettronegativo ( $SF_6$ ) che invece limita la crescita incontrollata delle valanghe. La miscela di gas descritta è altamente non eco-compatibile e al momento la sua produzione nell'Unione Europea è stata limitata, innalzandone i costi. Per questa ragione altri gas sono in fase di studio.

Esternamente, sulla superficie degli elettrodi è applicato un sottile (190  $\mu\text{m}$ ) film di polietilene tereftalato (PET) che ha proprietà isolanti. Le strip di rivelazione sono installate sui film di PET, in particolare le  $\eta$ -strip sono ortogonali al fascio, mentre le  $\phi$ -strip ne sono parallele. Le strip hanno una larghezza variabile nell'intervallo 24.5 – 33.3 mm e sono formate da rame di 17  $\mu\text{m}$  di spessore. Un secondo foglio di PET di spessore di 50  $\mu\text{m}$  è invece posizionato unicamente tra le  $\eta$ -strip e il rispettivo elettrodo (Figura 2.1a), risultando così in una carica minore rivelata dalle  $\eta$ -strip, rispetto a quella rivelata dalle  $\phi$ -strip per uno stesso evento di ionizzazione. Inoltre le strip sono tenute alla tensione di ground virtuale e sono separate di 2 mm l'una dall'altra.

## Struttura esterna

Per garantire la miglior copertura di rivelazione nella regione *barrel*, le RPC sono installate in tre livelli cilindrici e concentrici attorno all'asse del fascio, in settori azimutali più grandi e più piccoli (Figura 2.1b, e 1.5).

I tre livelli sono chiamati: RPC1 - *middle confirm layer*, RPC2 - *middle pivot layer*, RPC3 - *outer confirm layer* e quelli nei settori piccoli (grandi) si trovano a distanze di 7.8 m (6.8 m), 8.4 m (7.5 m) e 10.2 m (9.8 m) dal punto di collisione, rispettivamente. In questo modo, un muone che riesce ad attraversare tutti e tre i livelli di RPC fornisce fino a sei valori per ogni coordinata (ogni RPC è costituita da due livelli di rivelazione: il doppietto).

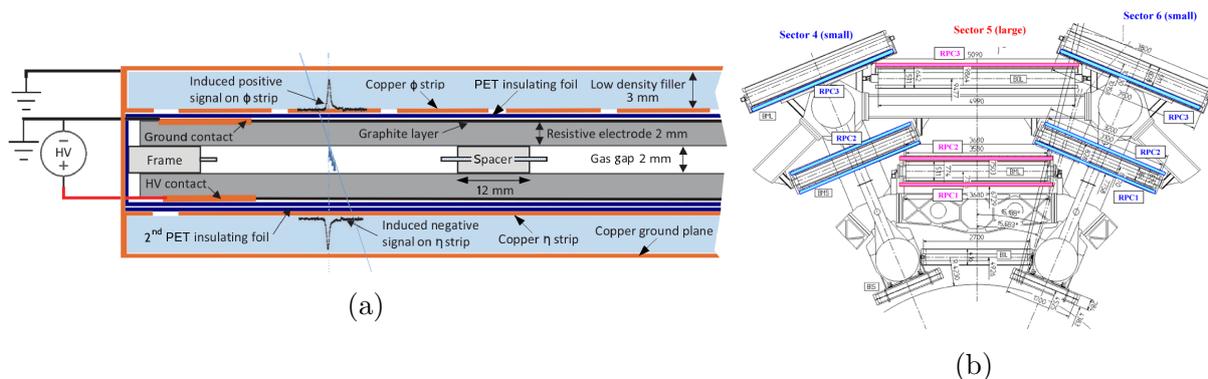


Figura 2.1: (a) *Struttura interna di una camera RPC*; (b) *disegno di una sezione di spettrometro di muoni in regione barrel, raffigurante i settori piccoli e grandi che ospitano le camere.*

## 2.3 La nuova generazione di camere RPC: camere BI-RPC

Come accennato alla fine del Capitolo 1, sono in corso una serie di modifiche all'apparato sperimentale di ATLAS che gli permetteranno di funzionare al meglio anche con le condizioni fisiche di HL-LHC, il nuovo acceleratore nel quale si trasformerà LHC. Tuttavia le attuali camere RPC non sono state costruite per operare alle condizioni di HL-LHC, pertanto a causa della futura elevata radianza di particelle potrebbero perdere efficienza. Per mantenere inalterata l'efficienza di trigger verranno prodotte<sup>2</sup> camere RPC di nuova generazione chiamate *BI-RPC* che saranno installate in un nuovo livello (BI - *Barrel Inner*) dello spettrometro di muoni. Le nuove camere saranno dotate di tre *gas gaps* indipendenti di spessore pari a 1 mm. La riduzione del *gas gap* comporta una diminuzione del voltaggio applicato ai due elettrodi della camera dal valore attuale di 9.6 kV a 5.4 kV, e migliora la risoluzione temporale dal valore attuale di 1.1 ns a 0.4 ns. Anche lo spessore degli elettrodi sarà ridotto e portato pari a 1.2 mm (gli spessori attuali sono di 1.8 mm), e saranno presenti amplificatori di nuova generazione a basso rumore per amplificare il segnale ottenuto con meno *gas gap*. In Tabella 2.1 sono riportate le differenze principali tra le vecchie e le nuove camere RPC.

La riduzione del voltaggio ai capi delle RPC comporta altri benefici alle camere, quale ad esempio il rallentamento dell'invecchiamento (fenomeno di ageing), permettendole di durare più a lungo.

Un problema che riguarda le RPC in generale, che interessa quindi anche le RPC di nuova generazione, consiste nella sostituzione del gas di funzionamento. Infatti l'at-

<sup>2</sup>Attualmente sono in fase di studio i prototipi delle camere BI-RPC.

Caratteristiche	RPC	BI-RPC
Gas gap	2 mm	1 mm
Voltaggio	9.6 kV	5.4 kV
Gaps per camera	2	3
Spessore elettrodi	1.8 mm	1.2 mm
Risoluzione temporale	1 ns	0.4 ns

Tabella 2.1: *Tabella riassuntiva delle differenze principali tra le camere RPC attualmente installate in ATLAS e quelle di nuova generazione chiamate BI-RPC.*

tuale miscela di gas, tetrafluoroetano(97.4%)-butano(5%)-esafluoro di zolfo(0.3%) ha un indice di inquinamento GWP (Global-Warming Potential) piuttosto elevato, a causa dell'esafluoro di zolfo ( $SF_6$ ) che è un gas serra, quindi è necessario sostituirlo con un gas meno nocivo. Altre miscele con un inferiore GWP che permetterebbero di mantenere un'alta efficienza di trigger sono già state individuate, e si sta procedendo a studiarne le caratteristiche sotto irraggiamento.

Una soluzione possibile quindi per mantenere comunque elevata l'efficienza del rivelatore è quella di utilizzare le vecchie camere RPC ad una inferiore efficienza (circa l'80%), con conseguente minore impiego di gas inquinante, e le nuove BI-RPC, nelle quali l'impiego di gas inquinante è già inferiore dato il minore *gas gap* di design. La diminuzione dell'efficienza delle vecchie RPC sarà quindi compensata dal nuovo livello di camere RPC.

# Capitolo 3

## Trigger di muoni e sistema di acquisizione dati

Nelle collisioni protone-protone ad alta frequenza si genera un elevato numero di particelle e prodotti di decadimento. Il sistema di trigger di ATLAS ha il compito di selezionare e salvare gli eventi di maggiore interesse, necessari poi per l'analisi dati *offline*. In particolare, il sistema di trigger presente nello spettrometro di muoni si occupa di registrare gli eventi con muoni ad alto impulso trasverso o con alta molteplicità di muoni perché sono indizio di particelle pesanti o di nuova fisica.

### 3.1 Struttura del trigger di muoni

Il sistema di trigger di ATLAS consiste in 2 livelli di selezione: *Level-1* (L1), e un filtro chiamato *High-Level Trigger*. Di seguito si descrive unicamente il trigger per muoni di ATLAS.

#### L1 trigger

Il primo livello di trigger per muoni ricerca indizi di muoni ad alto o basso impulso trasverso utilizzando camere RPC in regione *barrel* e TGC negli *end-caps*. L1 processa gli eventi a una frequenza di 40 MHz, settata dalla struttura dei fasci di particelle in LHC, i quali sono formati da pacchetti (*bunch*) di particelle, inviati ogni 25 ns. Successivamente, gli eventi vengono selezionati con una frequenza pari a 100 kHz, utilizzando solo una parte delle informazioni totali raccolte dal sistema di trigger. Una funzione essenziale di L1 è quella di identificare il corretto *bunch-crossing* a cui appartengono le particelle rivelate, ossia di identificare da quale urto di pacchetti di protoni del fascio sono state generate, e di misurarne l'impulso trasverso  $p_T$  utilizzando sei parametri programmabili: tre per i muoni a basso impulso trasverso e tre per muoni

ad alto impulso trasverso. I parametri per muoni a basso impulso trasverso sono relativi a  $p_T = 4, 6$  e  $10$  GeV, e sono identificati mediante notazione MU4, MU6, MU10. I parametri per muoni ad alto momento sono relativi a  $p_T = 10, 15$  e  $20$  GeV, identificati con MU11 (per distinguerlo da MU10 che è per muoni a basso impulso), MU15 e MU21 (per differenziarlo dal MU20, precedentemente esistente). Nel caso dei muoni però, le dimensioni fisiche dello spettrometro implicano un tempo di volo eccedente l'intervallo di 25 ns. Generalmente, la larghezza del segnale generato dal passaggio di un muone si estende su quattro bunch-crossing diversi. Perciò mentre L1 seleziona gli eventi, le informazioni ottenute dai rivelatori sono momentaneamente salvate in memorie (*pipeline*). La struttura del trigger di ATLAS richiede però che la latenza dovuta alla scelta di L1 non ecceda i  $2.5 \mu\text{s}$ .

Infine, le informazioni raccolte per  $\eta$  e  $\phi$  sono combinate per formare le RoI - *Region of Interest* (di dimensioni  $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0.1 \times 0.1$ ), che saranno inviate al secondo livello di trigger per un'ulteriore selezione.

## High Level Trigger - HLT

Il secondo livello di trigger analizza le RoI fornite da L1. Le informazioni contenute nelle RoI vengono utilizzate per selezionare solo gli eventi di interesse, e limitare l'ammontare di dati che sarà trasferito dal rivelatore.

La frequenza di selezione di HLT è approssimativamente 1 kHz, con un tempo di processamento medio per evento pari a 40 ms. Successivamente avviene un'ulteriore selezione degli eventi ad una frequenza di 200 Hz, con un tempo di processamento medio per evento di circa 4 s.

## 3.2 Algoritmo di trigger

Il compito base dell'algoritmo utilizzato nel livello L1 di trigger consiste nel verificare coincidenze di *hit* in differenti stazioni che siano entro regioni geometriche chiamate *trigger roads* (o semplicemente *roads*). Le *roads* sono finestre logiche comprese tra due traiettorie di muoni a minimo e massimo impulso, entro le quali si cerca la traccia del muone reale passante. La larghezza delle *roads* è in funzione del taglio su  $p_T$ : più stretta la *road*, maggiore il taglio sull'impulso trasverso, e quindi più probabile che la particella passante corrisponda a una particella ad alto impulso trasverso (Figura 3.1).

I sei parametri di soglia programmabili in funzione di  $p_T$  discussi precedentemente sono utilizzati per eseguire le operazioni logiche di selezione. Se un *hit* è generato nel secondo doppietto delle RPC (RPC2), allora viene iniziata una ricerca di un ulteriore *hit* ma questa volta nel primo doppietto, RPC1, entro la *road*. L'algoritmo di trigger viene applicato su entrambe le proiezioni  $\eta$  e  $\phi$  per ridurre la probabilità di selezione di falsi

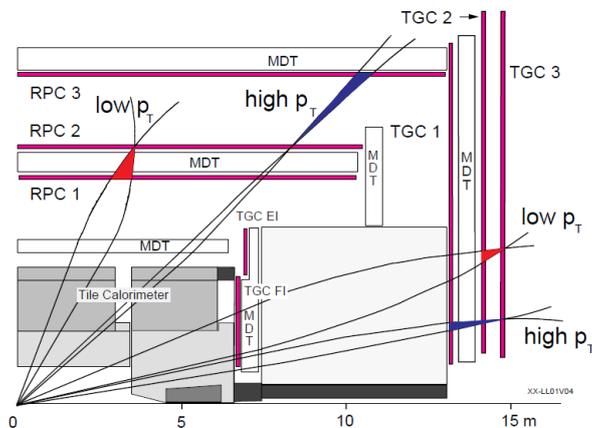


Figura 3.1: *Schema geometrico del funzionamento dell'algoritmo di trigger per muoni in una regione end-cap e una parte della regione barrel. Le coppie di traiettorie curve vengono utilizzate per generare le roads indicate dai coni blu (per muoni ad alto impulso), e dai coni rossi (per muoni a basso momento).*

eventi dovuti invece a particelle di bassa energia. Le regole di selezione delle particelle consistono in:

- almeno **3 su 4 coincidenze** sono richieste nei quattro livelli contenuti nei due doppietti **RPC1** e **RPC2**, per poter identificare un muone a **basso impulso trasverso**;
- le particelle che hanno superato la selezione per il basso impulso trasverso e in più hanno prodotto **1 su 2 hit** nel doppietto **RPC3** sono considerate particelle ad **alto impulso trasverso**.

### Livello L0 di trigger

Nel piano di *upgrade* di *Fase II* di ATLAS è previsto che l'attuale livello L1 di trigger venga sostituito con il nuovo **livello L0**, che ricoprirà quindi il ruolo di primo livello (hardware) di trigger. L0 sarà caratterizzato da una latenza di  $10 \mu s$ , quattro volte maggiore di quella del livello L1 che è di  $2.5 \mu s$ , permettendo così di sviluppare algoritmi più complicati di quelli attuali per la selezione degli eventi di interesse. Inoltre selezionerà gli eventi ad una frequenza di 1 MHz, dieci volte maggiore di quella attuale.

Sebbene l'attuale sistema di trigger abbia una buona selettività per quanto riguarda la quantità di moto delle particelle, in vista delle condizioni di aumentata luminosità di HL-LHC si aumenteranno l'accettanza geometrica e la rindondanza delle camere di trigger. A questo scopo, nella regione *barrel* dello spettrometro di muoni, verrà aggiunto

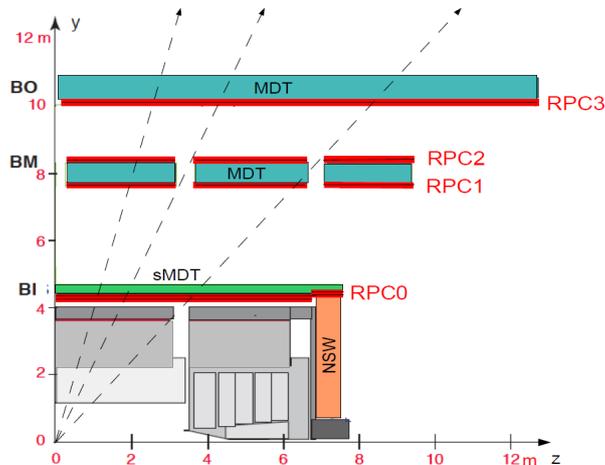


Figura 3.2: sezione trasversale di un settore piccolo (si intuisce dai buchi causati dalle bobine e dai supporti in BM) della regione di barrel dello spettrometro di muoni. Si mostrano i quattro livelli di camere RPC di trigger accoppiate con le MDT e sMDT in BI. Le linee tratteggiate rappresentano le traiettorie di muoni che attraversano quattro, due e tre livelli di trigger.

il livello BI di camere RPC chiamate BI-RPC, che includono camere di precisione e di trigger (Paragrafo 2.3). Nel nuovo livello le RPC saranno installate in aggiunta alle MDT in settori grandi, e insieme alle sMDT in settori piccoli.

L'aggiunta del livello BI permetterà inoltre di eseguire una misura più precisa della quantità di moto delle particelle poiché si disporrà di tracce con più *hit*. Si prevede che nonostante le vecchie camere funzioneranno ad un'efficienza inferiore, con l'installazione delle nuove in BI si otterrà comunque un'efficienza complessiva attorno al 95%. Le maggiori sorgenti di perdita di accettazione sono gli spazi occupati dalle bobine magnetiche e dai supporti della struttura attorno a  $\eta = 0$ , che impediscono l'installazione di camere di rivelazione. Il nuovo livello di RPC in BI estenderà l'accettazione geometrica del sistema di trigger in barrel, dall'80% (attuale) a circa il 96%. La Figura 3.3 mostra l'efficienza ottenuta (a) nel migliore dei casi previsti, e (b) nel peggiore dei casi in cui la tensione ai capi delle RPC viene ridotta in modo tale da ottenere un'efficienza di 65-85%.

Grazie alla maggiore frequenza di selezione del livello L0 si potranno analizzare più eventi, eliminando i falsi candidati incrociando gli *hit* delle RPC con quelli delle MDT.

Il nuovo trigger utilizzerà 9 livelli di gas gap, provvisti dai quattro livelli di RPC: tre per il livello RPC0 delle nuove camere-tripletti in BI, quattro per i livelli di doppietti in BM (RPC1 e RPC2) e due per il livello di doppietto in BO (RPC3). Il nuovo algoritmo di trigger è basato sulle seguenti regole:

- **3/3 camere** (l'attuale high- $p_T$  trigger): almeno 3 dei 4 gas gap di RPC1+RPC2 devono riportare coincidenze, insieme ad almeno 1 dei 2 di RPC3;

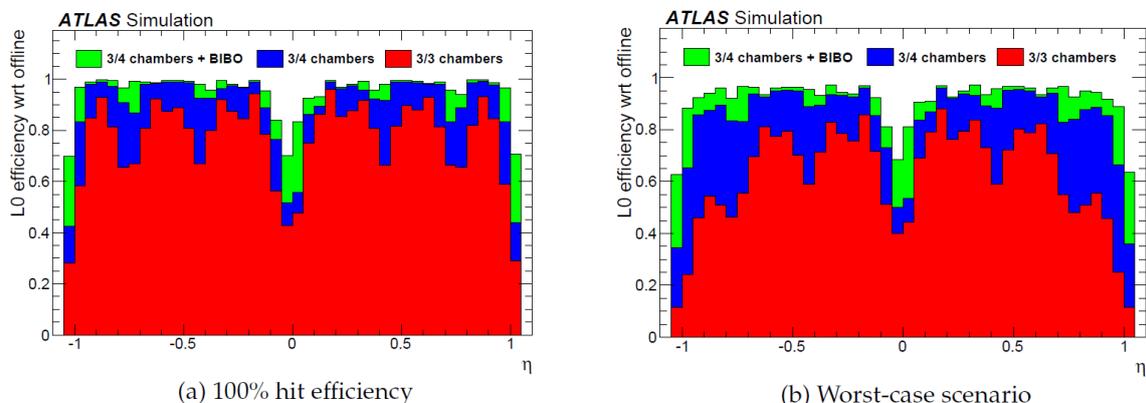


Figura 3.3: (a) efficienza del livello  $L_0$  di trigger in barrel per muoni con momento  $p_T = 25$  GeV, considerando il migliore scenario in cui si raggiunge il 100% dell'efficienza; (b) efficienza del livello  $L_0$  di trigger in barrel per muoni con momento  $p_T = 25$  GeV, considerando il peggior scenario in cui le singole efficienze di hit delle RPC sono 65-85% (dipendenti da  $\eta$ ). L'istogramma mostra l'efficienza delle camere RPC di trigger per la Run-2 (in rosso) e le efficienze delle camere nelle nuove configurazioni di trigger:  $3/4$  e  $3/4 + BIBO$ .

- **3/4 camere:** la regola precedente in logica OR con almeno 2 hit su 3 di RPC0 e almeno 3 di 6 di RPC1+RPC2+RPC3;
- **3/4 camere + BI-BO:** la regola precedente in logica OR con almeno 2 hit in RPC0 e almeno 1 in RPC3.

### 3.3 Catena di acquisizione dati e di trigger

Ogni volta che una strip di una camera RPC genera un segnale, esso è letto da schede elettroniche di *front-end* in cui viene convertito in formato digitale e viene generato un dato con le informazioni spaziali dell'*hit*. Successivamente il dato viene inviato alle schede elettroniche di trigger che aggiungono l'informazione sulla soglia di impulso trasverso soddisfatta, quindi viene inviato al processore centrale di L1 che deciderà se si sarà trattato di un *hit* di un muone passante, oppure se sarà stato causato da particelle di *background* (rumore) [15]. Nel primo caso, il dato viene salvato per l'analisi *offline*, mentre nel caso di un falso *hit* viene scartato, e le camere sono presto ripristinate per una nuova acquisizione.

L'elettronica della catena di acquisizione dati e di trigger si divide in: elettronica *on-detector*, ed elettronica *off-detector* (Figura 3.4).

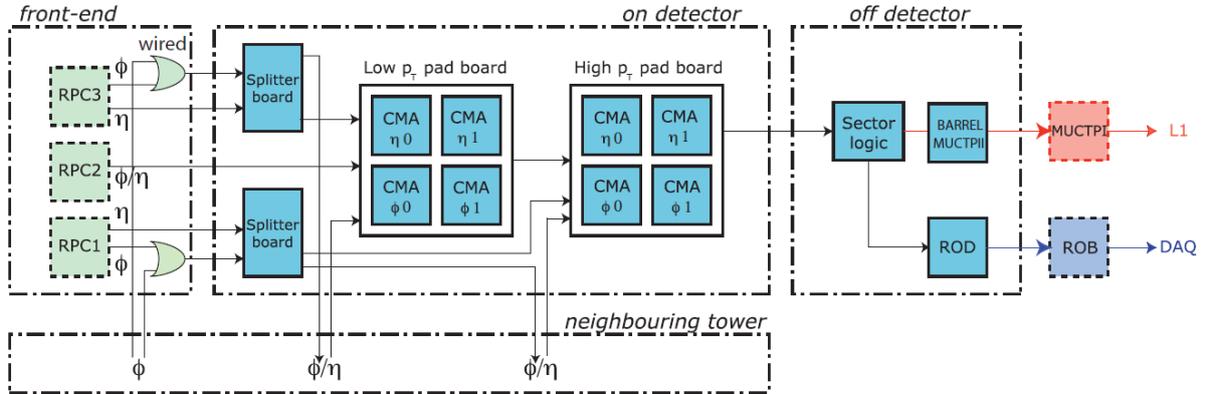


Figura 3.4: Schema della catena di processamento dei segnali RPC in risultati di trigger e di lettura, diviso nelle regioni elettroniche: *on-detector*, *off-detector*. MUCTPI e ROB sono schede elettroniche utilizzate come interfacce rispettivamente al sistema centrale di trigger e al sistema di acquisizione dati.

## Elettronica On-Detector

L'elettronica *on-detector* è l'elettronica fisicamente installata sulle camere RPC, e consiste in elettronica di *front-end*, e nelle schede elettroniche di trigger *Splitters* e *PAD box*<sup>1</sup>.

L'elettronica di *front-end* è costituita da schede collegate direttamente alle strip RPC (sia in  $\eta$  che in  $\phi$ )<sup>2</sup>, che amplificano il segnale, lo discriminano per distinguerlo dal fondo e lo convertono in digitale. Gli *splitter* ricevono i segnali dal *front-end* di più camere RPC e lo inviano alle PAD adiacenti (fino a un massimo di 2). Lo scopo di inviare le informazioni di una camera RPC a più PAD è quello di studiare anche tracce di particelle che potrebbero attraversare differenti livelli di diverse camere RPC adiacenti. Ogni PAD contiene due processori: *PAD low- $p_T$  processor*, e *PAD high- $p_T$  processor*, che processano le informazioni inerenti alle particelle a basso o alto impulso trasverso, rispettivamente. Ogni PAD copre una regione geometrica di  $\Delta\eta \times \Delta\phi \simeq 0.2 \times 0.2$ , ed è costituita da 8 matrici di coincidenza (CM): 4 per muoni ad alto impulso trasverso e altre 4 per muoni a basso impulso trasverso. Le CM sono chip programmabili che allineano nel tempo i segnali di *front-end*, eseguono le coincidenze di trigger in entrambe le coordinate  $\eta$  e  $\phi$ , ed eseguono il taglio sull'impulso trasverso  $p_T$  in tre diverse soglie. All'interno di un'unica PAD sono presenti quattro RoI (*Region of Interest*): due per le sovrapposizioni

<sup>1</sup>PAD non è un acronimo, ma sta per *PAD board* (o *box*), un tipo di scheda elettronica che collega due circuiti elettrici. In effetti il dato dopo essere stato creato dalle CM viene inviato alle PAD che lo processano e lo inviano alle SL, di fatto creando una catena elettronica di acquisizione.

<sup>2</sup>La lettera  $\eta$  rappresenta la *pseudorapidità*, e la lettera  $\phi$  l'angolo azimutale della traccia della particella. Entrambe le variabili sono descritte nel Paragrafo 1.2.1 del Capitolo 1

delle  $\phi$ -CM e due per le sovrapposizioni delle  $\eta$ -CM. La dimensione delle RoI delle CM è più fine di quella delle PAD e corrisponde a  $\Delta\eta \times \Delta\phi \simeq 0.1 \times 0.1$ .

Le sovrapposizioni di componenti elettroniche sono indispensabili a meno di perdita di efficienza dell'intero apparato, ma danno luogo a doppi conteggi che devono essere risolti dall'elettronica interessata. Ad esempio, i conteggi doppi dovuti alle sovrapposizioni delle CM vengono risolti dall'unità di processamento della PAD cui appartengono.

I segnali derivanti dai doppietti RPC1 ed RPC2 sono inviati ai processori *PAD low- $p_T$* , contenenti CM- $\eta$  e CM- $\phi$ , che producono output indipendenti che vengono poi processati dal processore *PAD high- $p_T$* . Invece i segnali derivanti dal doppietto RPC3 sono direttamente valutati dal processore *PAD high- $p_T$* . Infine, il dato cumulativo, contenente il risultato del *PAD low- $p_T$  processor*, e del *PAD high- $p_T$  processor*, è processato dalle cosiddette *high- $p_T$  PAD logic FPGA*.

Per ogni *bunch-crossing* le FPGA (o *high- $p_T$  PAD logic FPGA*) generano un risultato contenente le informazioni sulle RoI analizzate, che viene inviato poi al corrispondente settore logico dell'elettronica *off-detector*.

## Elettronica Off-Detector

L'elettronica *off-detector* riceve i segnali dall'elettronica *on-detector*, risolve i conteggi doppi causati dalla sovrapposizione di due PAD contigue inserendo un flag di *overlap* (sovrapposizione) all'interno del dato, e infine invia il messaggio così formato a MUCTPI e ROD, che sono schede elettroniche che interfacciano l'elettronica di acquisizione dati e di trigger con L1 e il sistema di acquisizione dati, rispettivamente.

Le schede dei settori logici (SL) collezionano le informazioni di tutte le camere appartenenti a un determinato settore di trigger: la regione *barrel* è così suddivisa in 64 settori di trigger (da 0 a 63): 32 in *side A* ( $z > 0$ ), e 32 in *side C* ( $z < 0$ ). Le informazioni giunte alle SL sono inserite in un pacchetto chiamato *RX frame*, trasmesso ai vicini ROD (*ReadOut Driver*). Il compito principale di un ROD è di creare un nuovo pacchetto di dato con le proprie informazioni, prima di inviare il risultato al successivo livello di acquisizione (il ROB - *ReadOut Buffer*).

Siccome il tempo massimo di latenza per la selezione di un evento è di  $2.5 \mu\text{s}$ , e il tempo di propagazione del dato associato attraverso la catena di acquisizione, dall'elettronica di *front-end* fino a L1, è di  $1 \mu\text{s}$ , il tempo massimo di processamento dei dati non può essere maggiore di  $1 \mu\text{s}$ .

Al momento dell'output di una scheda SL i dati di trigger e di acquisizione vengono divisi:

- i dati di acquisizione derivanti da 2 SL adiacenti sono collezionati da un unico ROD e successivamente inviati al DAQ (*Data Acquisition system*);
- il dato di trigger è inviato da una SL ad un input della MUCTPI.

Il flusso di uscita del canale di trigger è di 81.92 Gbit/s, fornito dai 64 settori di trigger che producono un nuovo risultato ogni 25 ns. Ogni parola di trigger contiene informazioni fino a due muoni candidati: la loro posizione nel piano  $\eta - \phi$ , la soglia di trigger più alta soddisfatta, il flag di *overlap* dei settori e informazioni di temporizzazione necessarie per sincronizzare il sistema.

Il flusso di uscita del canale di acquisizione (che contiene dettagli degli *hit* dei rivelatori) è di 1.28 Gbit/s.

### 3.4 Formato dei dati

Il dato di acquisizione è composto in passaggi consecutivi lungo la catena di acquisizione dati [16]. Dapprima, le CM eseguono l'algoritmo di trigger e impacchettano le informazioni in un frammento di dato chiamato *frammento CM*. Successivamente ogni PAD inserisce i frammenti CM derivanti dalle proprie matrici di coincidenza in un pacchetto detto *frammento PAD*. Di seguito tutti i frammenti PAD appartenenti allo stesso settore logico vengono inseriti nel *frammento RX*, contenuto a sua volta all'interno del *frammento ROD*, che completa così la complessa struttura del dato di acquisizione.

#### Frammento CM

Il frammento CM contiene il BCID (*Bunch Crossing Identification*) che identifica il *bunch-crossing* al quale appartiene la particella che ha generato l'*hit*, le coordinate spaziali e temporali dell'*hit*, e contiene informazioni sulla strip colpita. Il suo contenuto è impacchettato nella struttura mostrata in Figura 3.5. Il frammento inizia con una

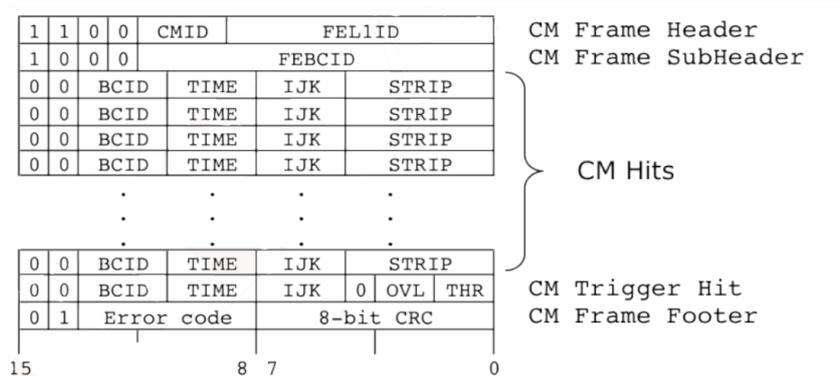


Figura 3.5: Scheletro del frammento CM.

*header* (intestazione) che contiene l'identificativo della CM (CMID), e l'identificativo del

*bunch-crossing* (FEL1ID) rivelato dell'elettronica di L1, mentre la *subheader* (un'ulteriore intestazione) contiene l'identificativo del *bunch-crossing* fornito dall'elettronica di *front-end* (FEBCID). Il motivo per cui il BCID è scritto da diverse schede elettroniche a diversi livelli è per verificare se tra un passaggio e l'altro della catena di acquisizione si sono verificati errori causati dalle radiazioni, come si discuterà meglio nel prossimo paragrafo.

Nel centro del frammento sono contenute le informazioni sugli *hit*, in particolare: *IJK* codifica il livello e la stazione RPC che ha fornito il segnale, e *STRIP* contiene il numero del canale della CM connesso alla strip RPC colpita.

Infine la struttura è completata da un *footer* (una conclusione), che contiene informazioni sugli errori che si sono verificati al livello delle CM.

In caso di frammento di trigger inoltre, vengono aggiunte altre parole di bit, contenenti informazioni sulla *strip* che ha generato il trigger stesso, la soglia più alta passata (*THR*), e un flag di *overlap* (*OVL*).

## Frammento PAD

Il frammento di PAD contiene le informazioni delle 8 CM che appartengono alla stessa scheda PAD, precedute ancora una volta da una *header* e conclusi con un *footer*, come mostrato in Figura 3.6. La *header* contiene l'identificativo del PAD (PAD ID), e l'identificativo *PAD L1ID* fornito da L1, che deve essere lo stesso di *FEL1ID* presente in ogni frammento CM associato, per garantire la sincronizzazione dei dati, anche esso argomento del prossimo paragrafo. Il *footer* contiene informazioni sugli eventuali errori presentatisi al livello della PAD.

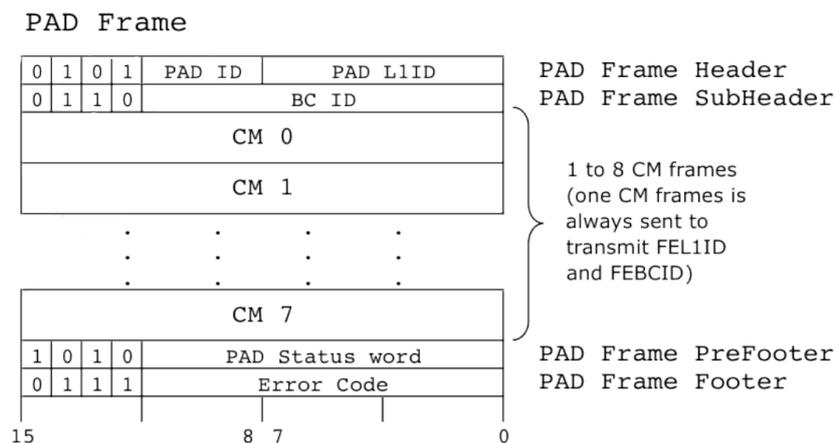


Figura 3.6: Scheletro del frammento PAD.



# Capitolo 4

## Monitoraggio della qualità della presa dati di ATLAS

Il rivelatore ATLAS è un sistema complesso, di conseguenza complesso è anche il sistema di monitoraggio delle sue componenti. L'operazione di monitoraggio comprende la registrazione dei parametri di funzionamento del rivelatore e un sistema di controllo della qualità durante la presa dati. Contemporaneamente, in modo automatico alcuni algoritmi svolgono azioni che vanno dalla correzione degli errori e produzione di istogrammi, sino alla segnalazione automatica delle anomalie dei rivelatori. Queste informazioni sono utilizzate dalle persone in turno di monitoraggio che valutano se intraprendere azioni per correggere i dati. I dati contenenti le informazioni di qualità sono poi registrati e resi disponibili per ulteriori analisi *offline* sia al *Tier 0* del CERN sia su server collocati negli istituti che partecipano alla collaborazione, in particolare per le camere RPC i dati del monitoraggio di qualità sono contenuti al *Tier 2* di Napoli, in Italia<sup>1</sup> [18].

Per le camere RPC il monitoraggio della qualità della presa dati è svolto da algoritmi che analizzano i dati in uscita dalle schede elettroniche ROD e quelli in uscita da L1, registrati in una stream dedicata, la *stream* DCM.

Nel Paragrafo 4.1 si descrive la struttura e il funzionamento dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS; nel Paragrafo 4.2 è invece descritto il codice di monitoraggio sviluppato.

### 4.1 Il sistema di monitoraggio attuale di ATLAS

Il monitoraggio attuale di ATLAS consiste principalmente in un sistema di controllo dei parametri fondamentali di funzionamento dei rivelatori (DCS - *Data Control System*) e

---

<sup>1</sup>ATLAS utilizza il *Worldwide LHC Computing Grid* (WLCG) per immagazzinare e ricostruire i dati. WLCG è organizzato in una struttura gerarchica ove il server *Tier 0* è situato al CERN ed è utilizzato per una ricostruzione iniziale. Successivamente i dati passano agli 11 siti *Tier 1* e poi ai *Tier 2*.

un sistema di monitoraggio della presa dati (DQM - *Data Quality Monitor*) che si divide in due parti: *online* e *offline*. Ad esempio si vuole controllare che le *rates* degli eventi per ogni soglia di trigger sia coerente con la luminosità istantanea fornita e che tutte le parti geometriche del rivelatore siano funzionanti (ovvero che ricevano ed inviino dati in modo uniforme). Oltre al corretto funzionamento del rivelatore è necessario monitorare anche l'intero sistema di acquisizione dati e di trigger. Questo viene fatto controllando che tutte le componenti elettroniche siano sincrone tra loro e con il *clock* di ATLAS<sup>2</sup>, e che i dati trasmessi siano integri, ovvero che contengano parti di apertura (*header*) e di chiusura (*footer*) dei frammenti di dato, o che comunque non vi siano altri tipi di errore<sup>3</sup>. Oltre al comportamento delle schede elettroniche si controlla il corretto funzionamento degli algoritmi di trigger, sia hardware (L1) che software (HLT). Gli algoritmi producono infine istogrammi che vengono controllati sia da esperti che da macro automatiche, che ricercano errori e malfunzionamenti dell'apparato strumentale.

Il flusso dei dati di qualità, dal momento in cui vengono generati al momento in cui sono registrati per l'analisi *offline*, è illustrato dettagliatamente in Figura 4.1 che verrà descritta nei prossimi sottoparagrafi.

## DCS - Detector Control System

Il DCS<sup>4</sup> controlla lo stato delle componenti hardware dei rivelatori rilevando ad esempio la loro temperatura, umidità, il valore dell'alta tensione fornita e controllando lo stato delle miscele di gas (nel caso di rivelatori a gas), verificando che siano nella norma e controlla che tutte le parti geometriche del rivelatore siano funzionanti, ovvero che ricevano ed inviino dati in modo uniforme.

## Data Quality Monitor - *online*

Il monitoraggio *online* della qualità dei dati è eseguito durante la presa dati da algoritmi che eseguono controlli automatici e dagli operatori di turno (*shifters*) nella stanza di controllo di ATLAS. Gli algoritmi eseguono i test del DQMF - *Data Quality Monitoring Framework* che consistono ad esempio nel controllo della compatibilità tra gli istogrammi generati e *istogrammi di riferimento*, ovvero istogrammi appartenenti alle

---

<sup>2</sup>La sincronia delle schede elettroniche (CM, PAD, SL e Rx) richiede che esse forniscano lo stesso identificativo di *bunch-crossing* durante il processamento dello stesso evento.

<sup>3</sup>L'interazione della radiazione con le schede elettroniche potrebbe fare perdere o modificare i bit dei dati, cambiandone così le informazioni contenute, e potrebbe rendere complicato il processo di chiusura del dato da parte di una scheda che dunque è costretta a troncane il processamento dello stesso e inviarlo in una struttura senza chiusura o apertura.

<sup>4</sup>Un ulteriore monitoraggio di basso livello (hardware) dei rivelatori è in realtà eseguito dal software GNAM, non descritto in questa tesi.

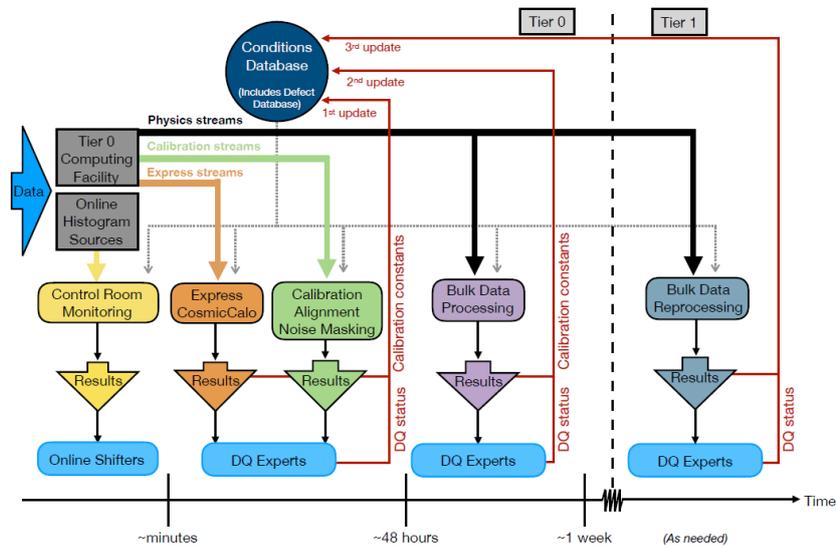


Figura 4.1: Diagramma schematico del flusso di dati di qualità della Run 2 di ATLAS. Il blocco con la scritta “Online histogram sources” contiene gli istogrammi generati da HLT, il sistema di acquisizione dati e dell’intera ricostruzione della frazione di eventi accettati dal trigger.

passate prese dati dove non si sono presentati errori ma nelle quali si sono utilizzate comunque condizioni simili di lavoro del rivelatore. Altri controlli del software DQMF consistono nel verificare che il numero di *entries* nei bins degli istogrammi di monitoraggio non superi una certa soglia, perché a quel punto vorrebbe dire che sono stati rilevati diversi errori e quindi vengono avvertiti gli operatori di turno.

Nella stanza di controllo di ATLAS risiedono gli operatori di turno il cui compito è quello di monitorare costantemente gli istogrammi e i flag di errori generati dagli algoritmi, avvisando in tempi celeri gli esperti nel caso di errori che richiedano interventi, al fine di minimizzare la perdita dei dati del rivelatore.

### Data Quality Monitor - *offline*

Il monitoraggio *offline* è eseguito quotidianamente sui dati registrati nei server, da operatori di turno. Per i rivelatori RPC gli istogrammi di monitoraggio e i risultati di DQMF sono processati e i risultati caricati su una pagina web ospitata dal Tier 2 di Napoli, in Italia [18]. La pagina web è ispezionata dagli esperti per accedere alle informazioni sul funzionamento del rivelatore. Le informazioni di monitoraggio caricate nelle pagine internet sono anche accessibili in un file formato ROOT, che può essere utilizzato per ulteriori analisi.

## 4.2 Monitoraggio della qualità della presa dati sviluppato per ATLAS

Come descritto nel precedente paragrafo, il sistema di monitoraggio di ATLAS è sviluppato in modo da fornire precise informazioni sulle singole *run*, mentre è più complicato visualizzare la frequenza degli errori di qualità nel tempo.

Il programma, sviluppato in Python e C++, utilizza le informazioni sugli errori di qualità di dato della *stream* DCM e delle *stream* ROD, generando nuovi istogrammi di monitoraggio in cui vengono mostrati i settori di trigger con errori in funzione dei *run*, con le frazioni di errore associate.

Nel Capitolo 3 si è spiegato che la regione *barrel* dello spettrometro di muoni è costituita da 64 settori di trigger: 32 in *side A* e 32 in *side C*. Ogni scheda elettronica ROD riceve dati da due settori di trigger, ad esempio il *ROD 0* riceve le informazioni dai settori di trigger 0 e 1 (Figura 4.2). Le informazioni di ogni ROD sono inserite nei file

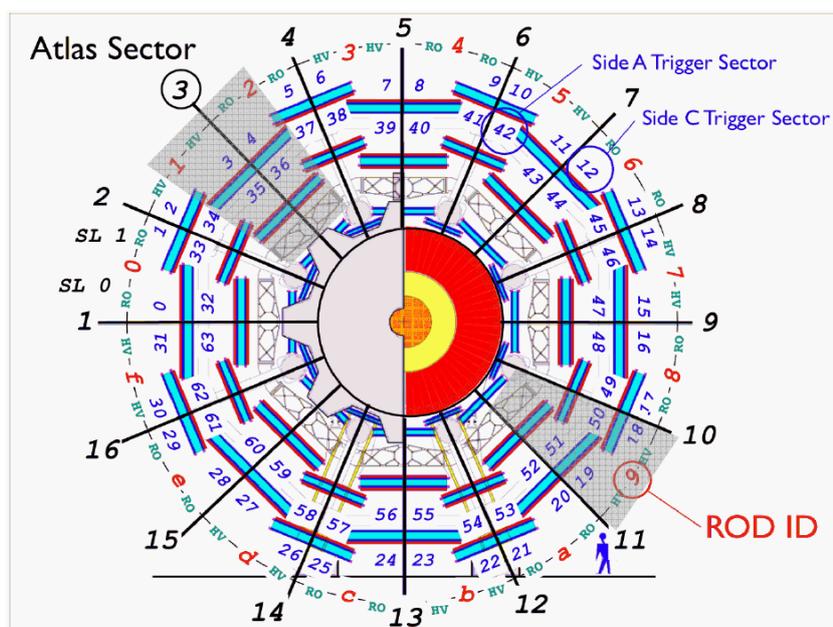


Figura 4.2: Schema grafico della regione barrel di ATLAS che mostra l'enumerazione dei settori di trigger e delle schede elettroniche ROD.

ROOT di monitoraggio e sono identificate con nomenclatura seguente:  $ROD-Bx-y$ , con  $x$  che indica se il ROD si trova in *side A* o in *side C*, ed  $y$  che indica il suo identificativo, che può andare da 00 a 15 a salti di una unità. La nomenclatura dei settori di trigger dunque è svolta nel seguente modo: i primi 32 settori sono identificati dai ROD in *side C* da 00 a 15 e i successivi 32 dai ROD in *side A* da 00 a 15. Un esempio:  $ROD-BC-15$  è il

ROD in *side C* che riceve informazioni dai settori di trigger 30 e 31, mentre *ROD-BA-15* è il ROD in *side A* che riceve informazioni dai settori di trigger 62 e 63. Dunque quando nei file ROOT di monitoraggio si controllano gli istogrammi generati con le informazioni dei ROD, si stanno osservando gli errori generatisi nei corrispondenti settori di trigger.

Nel Paragrafo 4.2.1 si descrivono i tipi di errori analizzati; nel Paragrafo 4.2.2 invece vengono mostrati gli istogrammi generati dal codice.

## 4.2.1 Le tipologie di errori di qualità dei dati monitorati

Gli errori di qualità dei dati che si sono monitorati sono quattro:

- errore di integrità di dato;
- errore di desincronizzazione dei dati;
- errore di *timeout* ed errore interno (*internal error*);

### L'integrità del dato

Gli errori di integrità si verificano a causa dell'interazione della radiazione ionizzante con le schede elettroniche dei rivelatori. Nel momento in cui una particella elettronicamente carica interagisce con l'elettronica per i fenomeni discussi nell'Appendice A, i dati possono essere cambiati e dunque forniscono informazioni sbagliate. In particolare si dice che un dato è corrotto quando l'elettronica non riesce a formarlo completamente, ovvero quando in esso mancano i bit di *header* e/o *footer* che devono invece essere scritti obbligatoriamente all'inizio e alla fine del dato (Capitolo 3).

L'integrità dei dati viene controllata a livello delle CM, e delle schede PAD, SL e RX, restituendo i seguenti errori a seconda della scheda in cui viene rilevato l'errore:

- *CM Header Miss*: mancanza della *header* in un frammento CM;
- *CM Foot Miss*: mancanza del *footer* in un frammento CM;
- *PAD Header Miss*: mancanza della *header* in un frammento PAD;
- *PAD SubHeader Miss*: mancanza della *subheader* in un frammento PAD;
- *PAD Foot Miss*: mancanza del *footer* in un frammento PAD;
- *SL Header Miss*: mancanza della *header* in un frammento SL;
- *SL Foot Miss*: mancanza del *footer* in un frammento SL;
- *Rx Header Miss*: mancanza della *header* in un frammento Rx;

- *Rx Foot Miss*: mancanza del footer in un frammento Rx.

La Figura 4.3a mostra l'istogramma generato dall'attuale sistema di monitoraggio in cui si mostra il tipo di errore di integrità rispetto al settore di trigger, e la frazione di errore, ove in particolare per il *run* 363979 il numero totale di eventi processati è 1355107. Sempre per lo stesso *run*, la Figura 4.3b mostra invece la frazione di errore registrata unicamente dal quindicesimo ROD in *side A* della regione di *barrel*, sulla tipologia di errore.

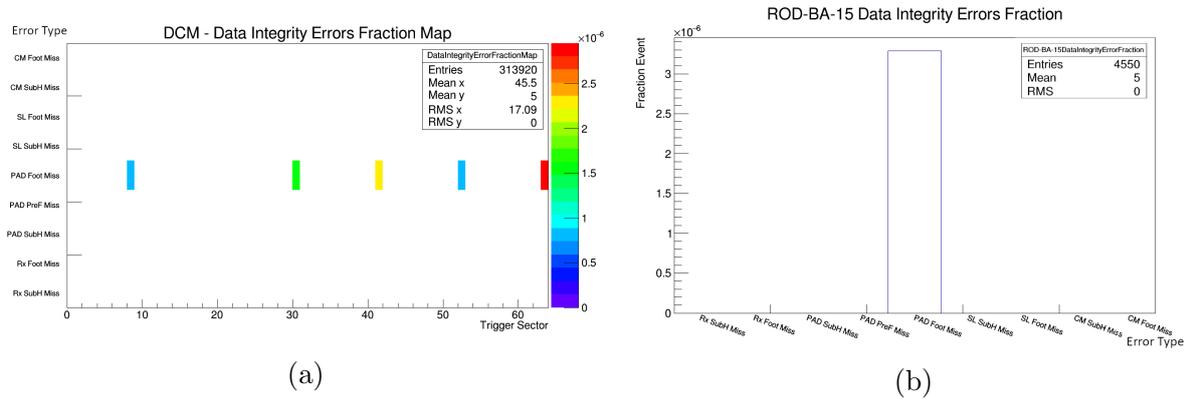


Figura 4.3: (a) Istantogramma bidimensionale dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS che mostra gli errori di integrità di dato rispetto ai settori di trigger; stream DCM; run: 363979. (b) Istantogramma dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS delle frazioni di errore di integrità di dato sui settori di trigger; stream ROD-BA-15; run: 363979.

## La desincronizzazione delle schede elettroniche

L'errore di desincronizzazione (o disallineamento) dei dati si presenta nel momento in cui differenti schede elettroniche forniscono diversi identificativi di *bunch-crossing* per lo stesso evento, oppure ne forniscono uno diverso da quello di L1. Ad esempio un frammento CM potrebbe salvare dati relativi a un certo *bunch-crossing* e una PAD potrebbe salvare dati relativi a un *bunch-crossing* differente. In questo caso le due schede non risulterebbero sincrone. Oppure potrebbe capitare che il BCID di una scheda non coincida con l'identificativo del *bunch-crossing* fornito da L1 perché ha perso la sincronia con il *clock* generale di ATLAS.

Gli errori di desincronizzazione monitorati sono:

- errore di desincronizzazione di BCID (*BCID alignment error*);
- errore di desincronizzazione LVL1 (*LVL1 alignment error*);

Ad esempio gli istogrammi monodimensionali in Figura 4.4a e 4.4b sono generati dall'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS e mostrano la frazione di errore di *BCID alignment* e *LVL1 alignment* sui settori di trigger, rispettivamente.

Infine l'istogramma in Figura 4.5 mostra la frazione di errore sul tipo di errore

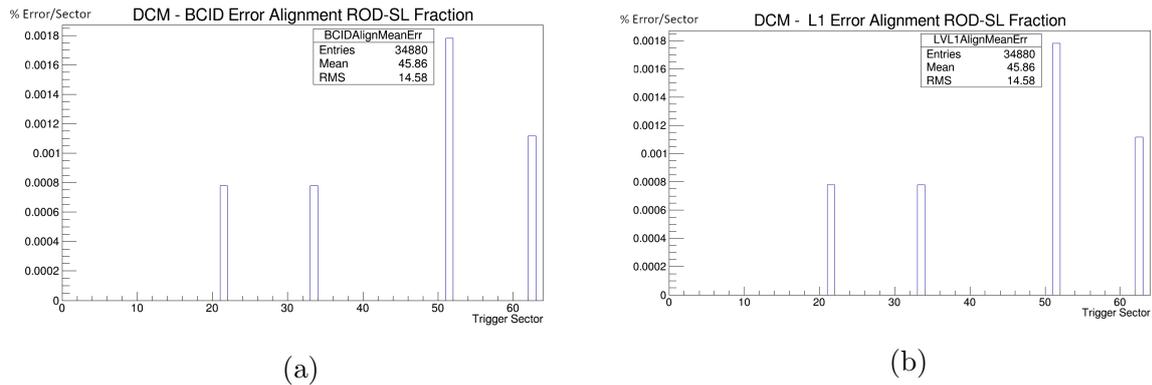


Figura 4.4: (a) Istantogramma dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS che mostra le frazioni di errori di desincronizzazione BCID in funzione dei settori di trigger; stream DCM; run 363979. (b) Istantogramma dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS che mostra le frazioni di errori di desincronizzazione LVL1 in funzione dei settori di trigger; stream DCM; run 363979.

segnalato dal solo *ROD-BA-15*.

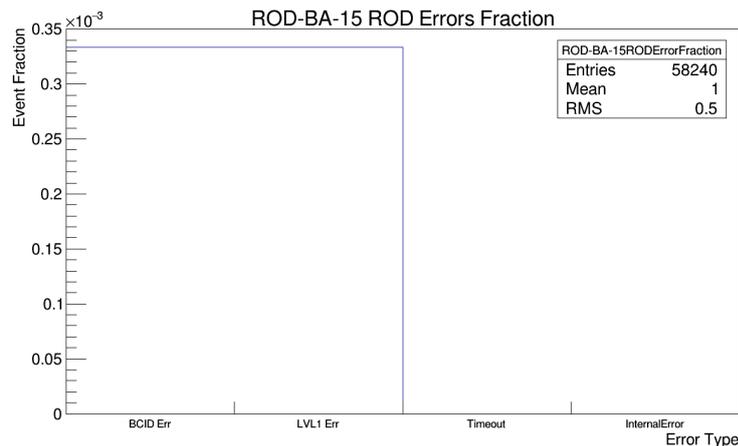


Figura 4.5: Istantogramma dell'attuale sistema di monitoraggio di ATLAS che mostra le frazioni di errore in funzione della tipologia di errore: desincronizzazione, timeout, internal; stream ROD-BA-15; run 363979.

## Timeout e internalError

L'intera catena di acquisizione dati dispone al massimo di 1  $\mu$ s per processare i dati prima del successivo *bunch-crossing* (Capitolo 3). Quando una scheda eccede il proprio tempo di processamento viene segnalato un errore di *timeout* e allo stesso tempo troncato il processo in esecuzione.

Una volta identificati gli errori di integrità di dato, desincronizzazione e *timeout*, la scheda potrebbe incorrere in altri tipi di errori durante il processamento del dato. Questi altri tipi di errori sono identificati nell'errore interno, non approfonditi in questa tesi.

### 4.2.2 Gli istogrammi generati dal codice sviluppato

Di seguito si mostrano gli istogrammi generati dal codice di monitoraggio sviluppato inerenti agli errori di qualità dei dati descritti nel paragrafo precedente.

#### Monitoraggio dell'integrità di dato

Gli errori di integrità di dato che si sono presentati al livello delle CM sono *CM SubHeader Miss* e *CM Foot Miss*, e quelli appartenenti alla *stream* DCM sono graficati in Figura 4.6 e 4.7, mentre quelli in Figura 4.8 appartengono alle *stream* ROD. Non sono stati rilevati altri errori nei frammenti CM.

Generalmente si nota che i *run* non contengono mai un solo errore isolato, ma se una scheda presenta errori allora anche quella successiva ne presenta, oppure la stessa scheda riporta più errori come succede per il *run* 363400, 363710, 364030 e 363664, settori 37 e 55, che riportano istanze in tutti i grafici appena citati.

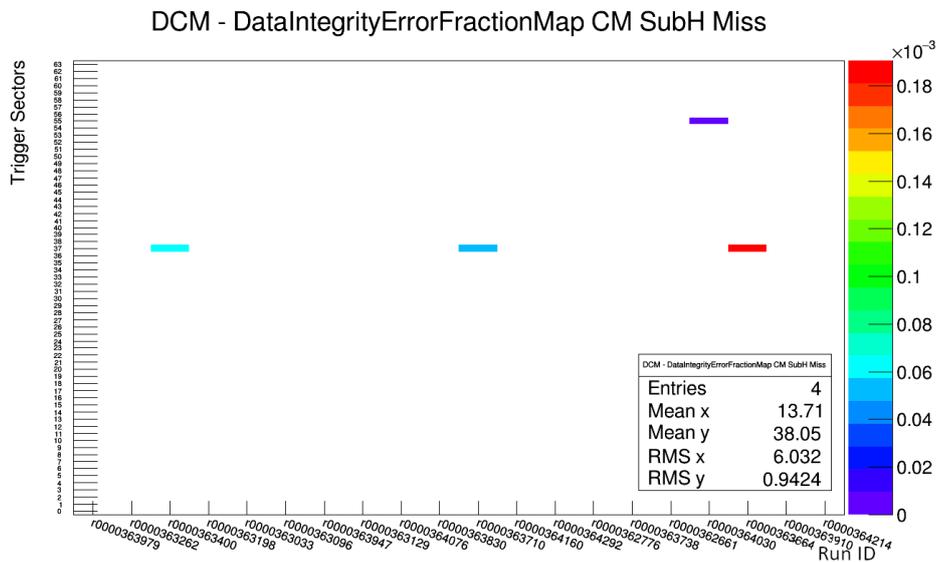


Figura 4.6: Istogramma degli errori di mancanza della subheader nel frammento delle CM in funzione dei run; stream DCM.

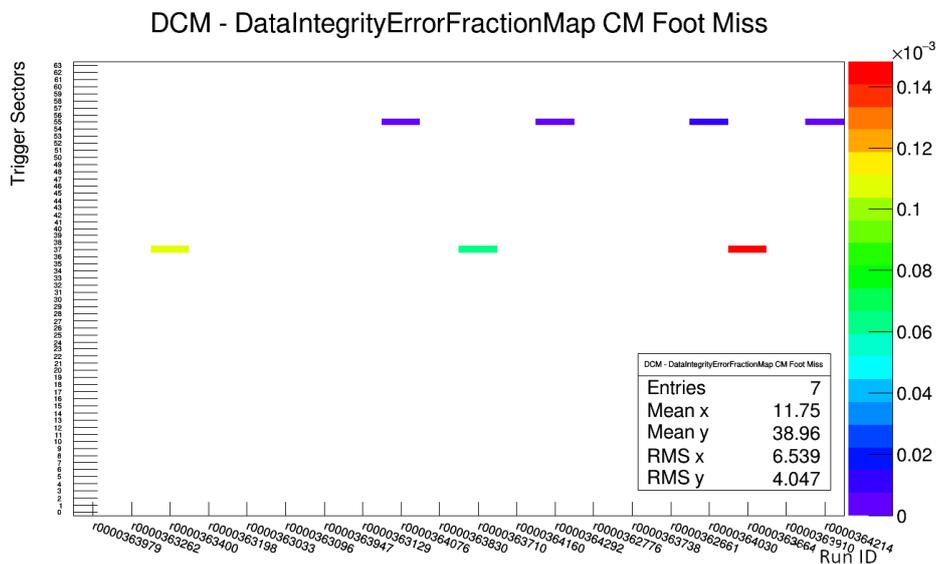


Figura 4.7: Istogramma degli errori di mancanza del footer nel frammento delle CM in funzione dei run; stream DCM.

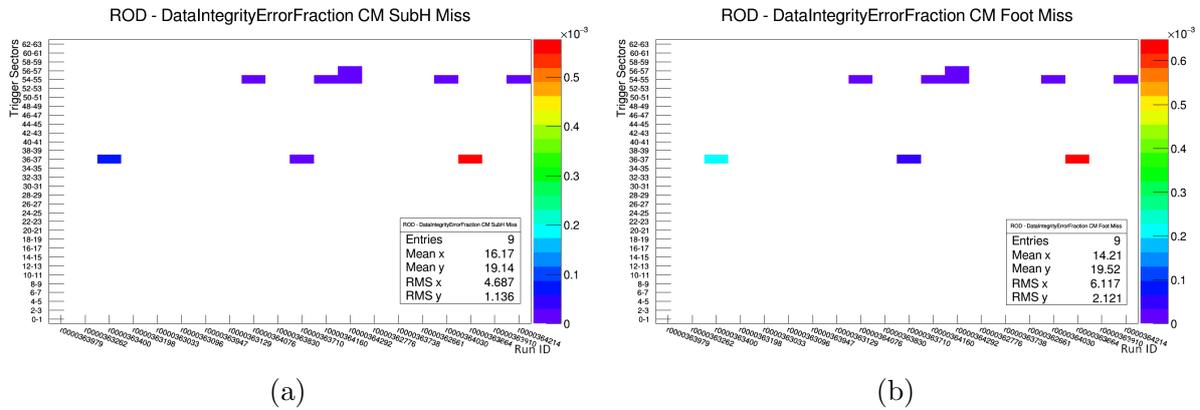


Figura 4.8: Istogramma degli errori di mancanza della subheader (a) e del footer (b) nel frammento delle CM in funzione dei run; stream ROD.

L'unico errore segnalato dalle schede PAD è l'errore *PAD Foot Miss*, graficato in Figura 4.9 e 4.10 per le stream DCM e ROD rispettivamente. In questo caso si nota proprio quello che si vuole cercare di mostrare con il codice di monitoraggio sviluppato: in Figura 4.10 i settori 22-23 e 8-9 riportano lo stesso errore in quasi tutti i run analizzati. Questo comportamento come detto potrebbe essere sintomo di qualche malfunzionamento e potrebbe dunque allertare gli esperti.

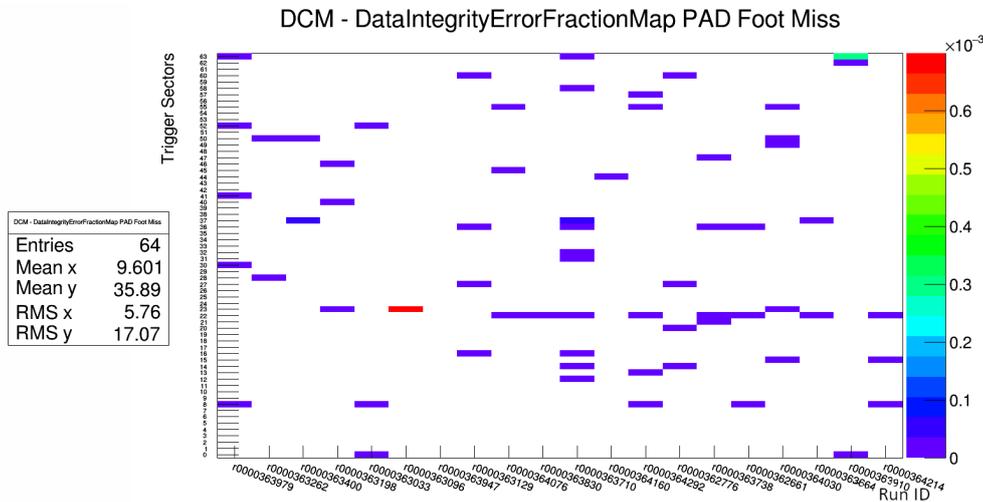


Figura 4.9: Istogramma bidimensionale dell'errore di mancanza del footer per il frammento PAD in funzione dei run; stream DCM.



unicamente nella run 364292, settori 56 e 57, ed è probabilmente associato all'errore di mancanza della subheader delle schede SL mostrato precedentemente.

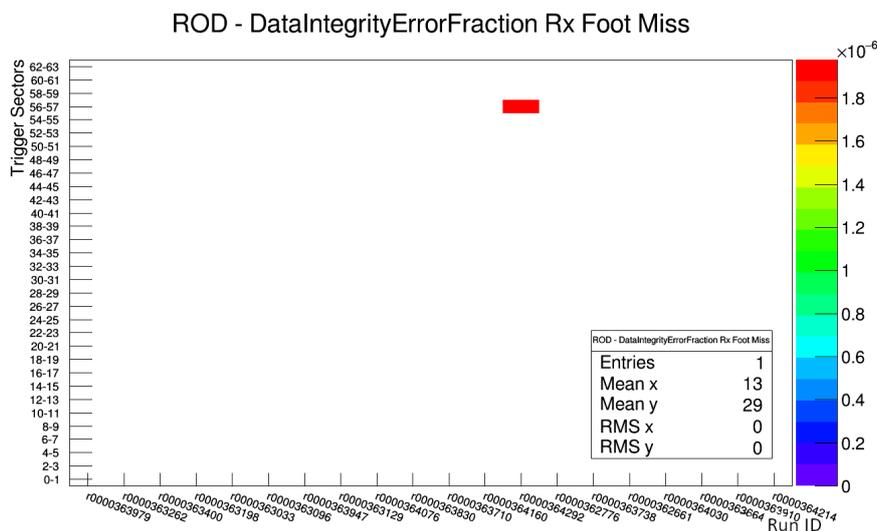


Figura 4.12: Istogramma dell'errore di mancanza del footer nel frammento Rx in funzione dei run; stream ROD.

## Monitoraggio delle Desincronizzazioni

I due grafici in Figura 4.13 rappresentano gli errori di desincronizzazione BCID, nella stream DCM e ROD, rispettivamente.

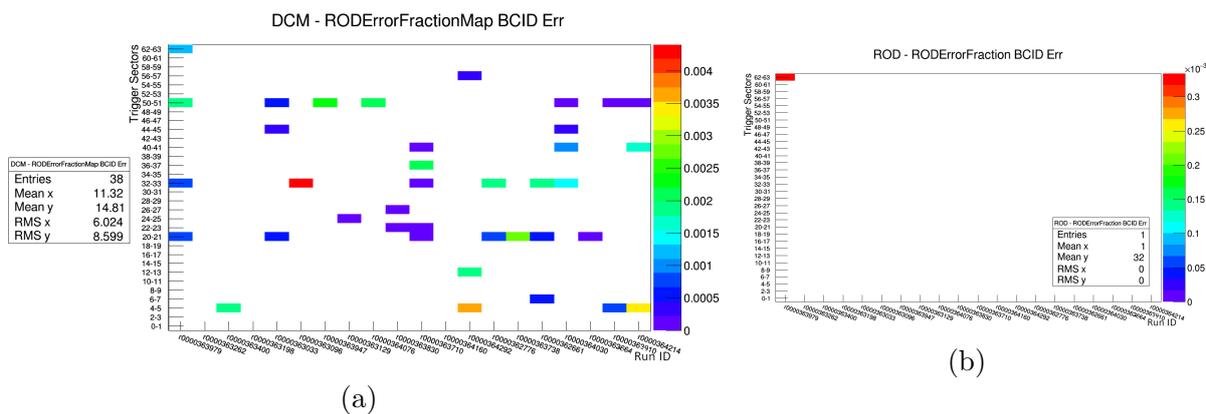


Figura 4.13: Istogrammi dell'errore di desincronizzazione del BCID in funzione dei run; stream DCM (a), stream ROD (b).

Analogamente i grafici in Figura 4.14 raffigurano i settori di trigger in cui si è verificato un errore di desincronizzazione LVL1, sul numero della run, e la frazione dell'errore.

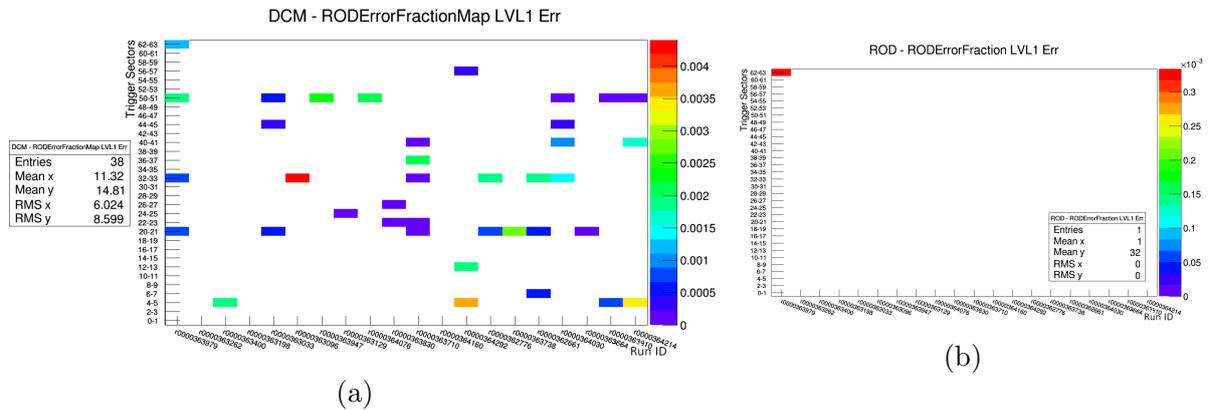


Figura 4.14: Istogrammi dell'errore di desincronizzazione del LVL1; stream DCM (a), stream ROD (b).

## Monitoraggio degli errori di timeout e interno

Gli errori di *Timeout* e di *Internal Error* non si sono mai verificati in nessuno dei 20 run ispezionati quindi gli istogrammi associati sono vuoti e non vengono riportati.

# Conclusione

L'obiettivo principale del lavoro di questa tesi è stato quello di fornire al sistema di monitoraggio dei rivelatori RPC di ATLAS, un ulteriore strumento che permettesse agli esperti di visualizzare l'andamento della qualità dei dati in funzione dei *run*. In questo modo, durante il *Run 3* e i successivi, si potrebbe facilitare l'individuazione dei settori di trigger con malfunzionamenti e contribuire a prevenire significative perdite di dati insieme alla rottura di componenti elettroniche del rivelatore.

In questo lavoro in particolare si sono analizzati 20 *run* della presa dati di ATLAS del 2018 e attraverso l'esecuzione del codice sviluppato si è riscontrato che alcuni settori di trigger hanno riportato per l'80-95% delle volte errori di qualità dei dati, mostrando quindi un'elevata frequenza di errore che potrebbe essere sintomo di malfunzionamenti.

Un interessante sviluppo futuro del codice potrebbe essere quello di educare sistemi ad apprendimento automatico attraverso gli istogrammi che esso stesso genererà durante il prossimo periodo di presa dati, in modo tale che impari a riconoscere i pattern di errore dei settori di trigger che eventualmente potrebbero smettere di funzionare correttamente, prevedendone quindi in anticipo la rottura delle schede elettroniche e la perdita dei dati.

# Appendici

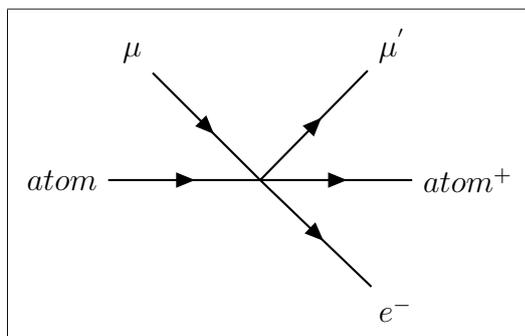
# Appendice A

## Interazioni particella-materia nei rivelatori a gas

Il principale fenomeno fisico che si presenta nell'interazione tra una particella elettricamente carica e il gas del rivelatore è il fenomeno di ionizzazione/eccitazione del gas, ma si verificano anche bremsstrahlung, effetto Compton, effetto Rayleigh e il fenomeno della produzione di coppie.

Di seguito si descrivono i fenomeni citati con particolare riferimento ai processi che avvengono all'interno delle camere RPC.

**Ionizzazione del gas:**  $\mu + \text{atomo} \rightarrow \mu' + \text{atomo}^+ + e^-$



Un muone passante attraverso la camera trasferisce parte della sua energia cinetica agli atomi e alle molecole del gas. Se il muone è sufficientemente energetico allora riesce a liberare un elettrone strappandolo all'attrazione coulombiana esercitata dal nucleo dell'atomo cui appartiene, creando così una coppia elettrone-lacuna, perché l'atomo privo del suo elettrone acquisisce una carica positiva (si *positivizza*).

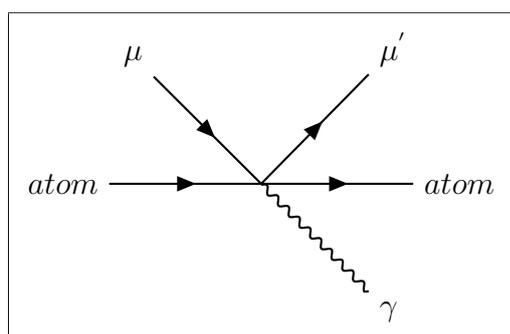
Le coppie elettrone-lacuna si creano lungo tutta la traiettoria della particella attraverso il gas del rivelatore, e fanno parte di quella che è chiamata *ionizzazione primaria*, ovvero l'insieme di coppie di ioni generate direttamente dall'interazione della particella elettricamente carica passante con il gas del rivelatore. La ionizzazione *secondaria* invece è generata dal conseguente effetto *a valanga* prodotto dalla ionizzazione primaria. Infatti a causa del campo elettrico applicato tra i due elettrodi, gli elettroni e gli ioni positivi vengono accelerati verso direzioni opposte, ma nel loro moto di deriva interagiscono

con altri atomi del gas, cedendo parte dell'energia cinetica guadagnata. Se l'energia acquisita da una carica tra un urto e quello consecutivo è sufficientemente elevata per liberare altri elettroni dagli atomi del gas, allora si ha quello che viene definito effetto *a valanga*: le cariche liberate interagiscono con gli atomi del gas liberando altre cariche, che a loro volta ne libereranno altre interagendo con altri atomi del gas circostante, e così via... Le cariche elettriche liberate vengono successivamente raccolte dai due elettrodi generando una corrente misurabile che servirà per formare il segnale delle camere RPC, il quale verrà poi processato dall'elettronica del rivelatore per formare un dato con le informazioni sulla particella passante (Capitolo 2).

Se la particella incidente non è abbastanza energetica per ionizzare gli atomi del gas, allora questi vengono solamente eccitati, ovvero portati ad un livello di energia superiore a quello di energia fondamentale. Successivamente, col passare del tempo, gli atomi ritornano nei loro stati fondamentali emettendo fotoni o elettroni di Auger. Di seguito i fotoni emessi vengono riassorbiti per effetto fotoelettrico, oppure se hanno abbastanza energia riescono a penetrare la camera e a fuggire via. L'energia persa per fuga di fotoni non è in alcun modo rilevabile dalle camere RPC, quindi se i fotoni non vengono riassorbiti per effetto fotoelettrico si perde parte del segnale della particella incidente.

In realtà bisognerebbe includere un ulteriore effetto di campo che si viene a creare nella generazione di coppie elettrone-lacuna. Infatti, gli ioni positivi sono molto più massivi degli elettroni, quindi il loro moto è molto più lento. Questa diversità nei periodi dei moti genera una differenza di potenziale locale, quindi un campo elettrico che scherma in parte il campo elettrico esterno applicato tra i due elettrodi. Il fenomeno di chiama *space charge effect*, e sono presenti modelli che ne tengono conto nella simulazione del funzionamento di una RPC [14].

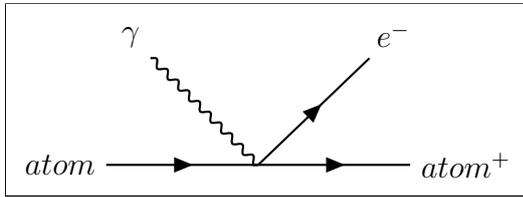
**Radiazione di Bremsstrahlung:**  $\mu + \text{atomo} \rightarrow \mu' + \gamma + \text{atomo}$



Muoni con un'elevata energia cinetica riescono ad interagire col nucleo degli atomi del gas delle RPC, oltrepassando gli orbitali elettronici. In particolare, data la massa molto maggiore dei nuclei, la traiettoria della particella incidente viene curvata emettendo un fotone *bremsstrahlung* (di frenamento).

Il fotone successivamente può essere riassorbito per effetto fotoelettrico, o se abbastanza energetico può fuggire dalla camera.

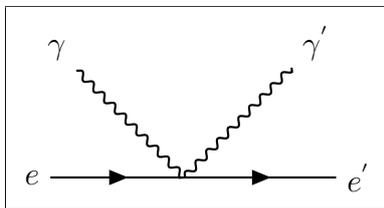
**Effetto Fotoelettrico:**  $\gamma + \text{atomo} \rightarrow \text{atomo}^+ + e^-$



Un fotone emesso per diseccitazione o bremsstrahlung può essere riassorbito dal gas, e nel caso in cui la sua energia iniziale fosse maggiore dell'energia di legame di un elettrone legato a un atomo del gas, allora sarebbe in grado di liberarlo, generando una coppia elettrone-lacuna.

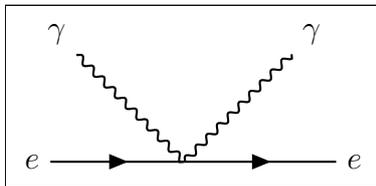
L'effetto fotoelettrico dunque alimenta le valanghe elettroniche nel gas.

**Diffusione Compton:**  $\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$



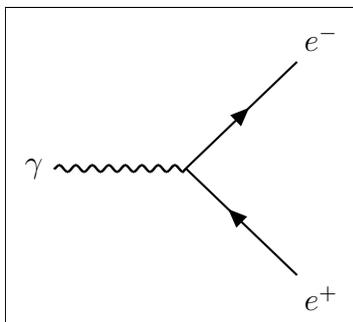
Un fotone emesso interagisce con un elettrone degli orbitali più esterni degli atomi del gas, cedendogli energia sufficiente per liberarlo, venendo deflesso di un angolo  $\theta$  in una direzione diversa dalla direzione di incidenza.

**Diffusione Rayleigh:**  $\gamma + e \rightarrow \gamma + e$



Un fotone emesso interagisce elasticamente con un elettrone di un atomo del gas e viene diffuso con un angolo  $\theta$  in una direzione diversa da quella di incidenza, ma essendo l'interazione elastica, il fotone non perde energia, quindi alcun elettrone viene liberato.

**Produzione di coppie:**  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$



Il fotone emesso può annichilirsi dando luogo ad una coppia elettrone-positrone. Il fenomeno avviene solo se il fotone iniziale possiede un'energia maggiore di circa 1.022 MeV, energia necessaria per creare la coppia elettrone-positrone a riposo nel sistema di riferimento del centro di massa.

# Bibliografia

- [1] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC”, *Phys. Lett. B* 716, 2012. DOI: [10.1016/j.physletb.2012.08.020](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020).
- [2] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider.”, *JINST Journal of Instrumentation* 3, 2008. DOI: [10.1088/1748-0221/3/08/S08003](https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/08/S08003).
- [3] M. Aaboud *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Evidence for the associated production of the Higgs boson and a top quark pair with the ATLAS detector”, *Phys. Rev. D* 97, 2018. DOI: [10.1103/PhysRevD.97.072003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.072003).
- [4] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector”, *Phys. Lett. B* 812, 2021. DOI: [10.1016/j.physletb.2020.135980](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135980).
- [5] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Measurements of the Higgs boson inclusive and differential fiducial cross sections in the  $4\ell$  decay channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV”, *The European Physical Journal C* 80, 2020. DOI: [10.1140/epjc/s10052-020-8223-0](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8223-0).
- [6] M. Aaboud *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Search for heavy Majorana or Dirac neutrinos and right-handed W gauge bosons in final states with two charged leptons and two jets at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Journal of High Energy Physics* 16, 2019. DOI: [10.1007/JHEP01\(2019\)016](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2019)016).
- [7] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in  $\sqrt{s} = 13$  TeV  $pp$  collisions using the ATLAS detector”, *The European Physical Journal C* 80, 2020. DOI: [10.1140/epjc/s10052-019-7594-6](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7594-6).
- [8] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Search for high-mass dilepton resonances using  $139 \text{ fb}^{-1}$  of  $pp$  collision data collected at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *Physics Letters B* 796, 2019. DOI: [10.1016/j.physletb.2019.07.016](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.07.016).
- [9] M. Aaboud *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Measurement of the W-boson mass in  $pp$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector”, *The European Physical Journal C* 78, 2018. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5475-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5475-4).

- [10] M. Aaboud *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Observation of Electroweak Production of a Same-Sign W Boson Pair in Association with Two Jets in  $pp$  Collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS Detector”, *Physical Review Letters* *123*, 2019. DOI: [10.1103/PhysRevLett.123.161801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.161801).
- [11] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Measurement of the transverse momentum distribution of Drell-Yan lepton pairs in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, *The European Physical Journal C* *80*, 2020. DOI: [10.1140/epjc/s10052-020-8001-z](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8001-z).
- [12] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Combination of the W boson polarization measurements in top quark decays using ATLAS and CMS data at  $\sqrt{s} = 8$  TeV.”, *Journal of High Energy Physics* *51*, 2020. DOI: [10.1007/JHEP08\(2020\)051](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2020)051).
- [13] G. Aad *et al.* (*ATLAS Collaboration*), “Measurement of the  $t\bar{t}$  production cross-section in the lepton+jets channel at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS experiment.”, *Physics Letters B* *810*, 2020. DOI: [10.1016/j.physletb.2020.135797](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135797).
- [14] C. Lippmann, “Detector Physics of Resistive Plate Chambers”, *CERN Document Server*, 2003. indirizzo: <http://cds.cern.ch/record/1303626>.
- [15] G. Ciapetti F. Anulli, “The Level-1 Trigger Barrel System of the ATLAS Experiment at CERN”, *JINST* *4*, 2009. DOI: [10.1088/1748-0221/4/04/P04010](https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/04/P04010).
- [16] G. Carlino A. Aloisio, “Final Data Format of the RPC Detector of the Muon System.”, *CERN Document Server*, 2006. indirizzo: <https://cds.cern.ch/record/944095>.
- [17] D. Francis C. Bee, “The raw event format in ATLAS Trigger & DAQ.”, *Cern Document Server ATLAS-DAQ-98-129, ATLAS-COM-DAQ-98-018, CERN-ATLAS-DAQ-98-129*, 1998. indirizzo: <http://cds.cern.ch/record/683741>.
- [18] Online Histogram Presenter, “Histograms for RPC”, (ultimo accesso: 23.09.2021). indirizzo: <http://atlasui.na.infn.it:8088/~l1mu/2018/ohp/>.