

Università degli Studi di Genova

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Anno Accademico 1999/2000

Tesi di Laurea in Fisica

**Studio delle caratteristiche
funzionali del rivelatore a pixel di
ATLAS e loro impatto sulle
prestazioni degli algoritmi di
identificazione dei quark b**

Candidato:

Carlo Schiavi

Relatore:
Dott. Paolo Morettini

Correlatore:
Prof. Mauro Taiuti

Indice

Riassunto	1
1 LHC e ATLAS	3
1.1 LHC	3
1.1.1 Caratteristiche generali	3
1.1.2 Caratteristiche costruttive	6
1.2 ATLAS	8
1.2.1 Caratteristiche generali	8
1.2.2 Il sistema di magneti	10
1.2.3 L’Inner Detector	10
1.2.4 I calorimetri	12
1.2.5 Lo spettrometro di muoni	13
1.2.6 Il sistema di trigger e acquisizione dati	14
2 La fisica ad ATLAS	17
2.1 Il Modello Standard	17
2.1.1 Il meccanismo di Higgs	18
2.1.2 Estensioni del Modello Standard	19
2.2 Obiettivi dell’esperimento ATLAS	20
2.2.1 Il periodo di luminosità ridotta	20
2.2.2 Il periodo di luminosità massima	22
3 Il Module Controller Chip	25
3.1 Geometria del rivelatore a pixel	25
3.2 La catena di acquisizione	27
3.2.1 I protocolli di trasmissione dati	29
3.3 Il Module Controller Chip	31
3.3.1 Il Trigger Timing and Control	32
3.3.2 I Receiver	34
3.3.3 L’Event Builder	36
3.3.4 Il Command Decoder	37
3.4 SimPix	38
3.4.1 La generazione degli hit	39

3.4.2	La simulazione dell'elettronica	40
3.4.3	Il modulo di analisi e ricostruzione	41
4	Efficienza di un singolo modulo	43
4.1	La simulazione	43
4.1.1	Scopo della simulazione	43
4.1.2	Le condizioni simulate	45
4.2	Risultati	49
4.2.1	Parametri di implementazione	49
4.2.2	Robustezza della configurazione scelta	53
4.2.3	Geometria del rivelatore ed efficienza	59
4.3	Conclusioni	61
5	Il trigger di LEVEL2	63
5.1	La ricostruzione di traccia e b -tagging	63
5.2	PixTrig	64
5.2.1	L'algoritmo di ricostruzione di traccia	65
5.2.2	Ricostruzione della coordinata Z del vertice primario	68
5.2.3	L'algoritmo per il b -tagging	68
6	Efficienza del rivelatore a pixel	73
6.1	La simulazione	73
6.1.1	Scopo della simulazione	73
6.1.2	Le condizioni simulate	74
6.2	Risultati	80
6.2.1	Ricostruzione di singola traccia	80
6.2.2	b -tagging	81
6.3	Conclusioni	82
	Conclusioni	93
	Bibliografia	95

Elenco delle figure

1.1	Anello di LHC	5
1.2	Sezione del sistema di magneti di LHC	7
1.3	Catena di iniezione di LHC	8
1.4	Schema a blocchi del sistema di trigger ed acquisizione dati di ATLAS	15
2.1	Sensibilità di ATLAS alla scoperta del bosone di Higgs del Modello Standard	22
2.2	Sensibilità di ATLAS alla scoperta dei bosoni di Higgs del MSSM	24
3.1	Struttura del rivelatore a pixel di ATLAS	26
3.2	Schema di un modulo del rivelatore a pixel di ATLAS	27
3.3	Fotografia di un modulo del rivelatore a pixel di ATLAS	27
3.4	Schema di assemblaggio del rivelatore a pixel di ATLAS	28
3.5	Formato di output dei front-end	30
3.6	Formato di output del Module Controller Chip	31
3.7	Fattore di compressione	32
3.8	Schema a blocchi del Module Controller Chip	33
3.9	Algoritmo di gestione della score board	35
3.10	Schermata del programma SimPix	38
4.1	Occupazione media dei singoli pixel del rivelatore	47
4.2	Distribuzione degli hit sul modulo analizzato	49
4.3	Risultati ottenuti per la configurazione con velocità di trasferimento in uscita pari a 40 Mbit/s	50
4.4	Risultati ottenuti per la configurazione con velocità di trasferimento in uscita pari a 80 Mbit/s	51
4.5	Risultati ottenuti per la configurazione con velocità di trasferimento in uscita pari a 160 Mbit/s	52
4.6	Valor medio della distribuzione degli hit sul modulo analizzato in funzione del numero di eventi di fondo	54

4.7	Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 160 Mbit/s	55
4.8	Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 160 Mbit/s	56
4.9	Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 80 Mbit/s	57
4.10	Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 80 Mbit/s	58
4.11	Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: caso della geometria con raggio del b -layer pari a 4 cm	59
4.12	Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: caso della geometria con raggio del b -layer pari a 4 cm	60
5.1	Distribuzione del valore assoluto del parametro d'impatto d_0 per b -jet ed u -jet	69
5.2	Variabile discriminante X utilizzata per il b -tagging	71
6.1	Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$. .	76
6.2	Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$. .	77
6.3	Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$. .	78
6.4	Confronto tra la percentuale di hit persi complessivamente nel b -layer e quella ottenuta conteggiando unicamente gli hit dei b -jet	79
6.5	Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$.	83
6.6	Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$.	84
6.7	Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$.	85
6.8	Risoluzione sul parametro di impatto prima e dopo la simulazione della catena di acquisizione	86
6.9	Efficienza intrinseca dell'algoritmo di ricostruzione di traccia prima e dopo la simulazione della catena di acquisizione . . .	87
6.10	Frazione di tracce da b perse per effetto delle inefficienze di acquisizione per occupanza del "b-layer" pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$. .	88
6.11	Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging al variare della quantità di fondo introdotta	89

6.12	Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$	90
6.13	Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$	91
6.14	Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$	92

Riassunto

Lo scopo di questo lavoro di tesi è fornire una dettagliata caratterizzazione del funzionamento del rivelatore a pixel di ATLAS, esperimento dedicato allo studio delle collisioni protone-protone che si avranno ad LHC (Large Hadron Collider) e descritto in dettaglio nel capitolo 1. LHC è un acceleratore progettato per fornire un'elevata luminosità ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), ottenuta incrociando i due fasci di protoni ogni 25 ns. Tale soluzione, adottata allo scopo di garantire una sufficiente statistica anche per eventi dalla bassa sezione d'urto, comporta, per contro, la necessità di utilizzare catene di acquisizione dati particolarmente sofisticate. Tutti i rivelatori presenti in ATLAS dovranno, infatti, avere un tempo di risposta inferiore ai 25 ns, ed essere in grado di memorizzare temporaneamente le informazioni prodotte, fino a quando il meccanismo di trigger non abbia deciso se selezionare o meno l'evento al quale appartengono, decisione per la quale sono necessari almeno $2.5 \mu\text{s}$. È di importanza primaria che tale funzione venga svolta correttamente, perché, in caso contrario, si verificherebbero irrimediabili perdite di dati, che rischierebbero di compromettere la possibilità di ricostruire tutte le informazioni fisiche interessanti sui prodotti delle collisioni.

Il problema dell'elevato carico di lavoro per la catena di acquisizione dati è particolarmente rilevante nel caso del rivelatore a pixel. Infatti, tale componente dell'esperimento, essendo progettata per misurare con precisione la posizione dei vertici secondari di decadimento, è posta nell'immediata prossimità del vertice di interazione; di conseguenza, è particolarmente esposta alle tracce di fondo prodotte insieme alle interazioni primarie protone-protone, come pure all'alone dei fasci.

In particolare, lo studio presentato è volto a valutare la funzionalità ed il grado di efficienza dei moduli di elettronica dedicati alla lettura dati per il rivelatore a pixel.

A tale scopo mi sono occupato dello sviluppo di alcune parti di SimPix, un programma di simulazione dell'elettronica di lettura dei moduli del rivelatore a pixel. Tale pacchetto, descritto in dettaglio nel capitolo 3, permette di riprodurre il comportamento della catena di acquisizione dati per l'intero rivelatore. La descrizione utilizzata, pur non garantendo un dettaglio paragonabile a quello ottenuto tramite simulazioni a basso livello delle operazioni svolte dai singoli circuiti, fornisce una quantità di informazioni mol-

to maggiore rispetto a quella data da descrizioni puramente parametriche, usualmente utilizzate nelle simulazioni della risposta del detector a segnali di interesse fisico. Dai risultati delle analisi effettuate con tale strumento, possono infatti essere desunte molte informazioni riguardo alle inefficienze riscontrate, comprese le loro principali cause e le conseguenze che ne derivano.

Tramite l'utilizzo di SimPix, ho effettuato, dapprima, uno studio volto a valutare le caratteristiche ottimali dell'elettronica di lettura del rivelatore, cioè quelle che ne garantiranno la capacità di far fronte alle più pessimistiche condizioni di lavoro in cui verrà a trovarsi ad LHC. Tale valutazione risulta di particolare importanza nella fase attuale di sviluppo del rivelatore, durante la quale i parametri di implementazione dei circuiti utilizzati non sono state ancora completamente delineate. Le informazioni ottenute dallo studio presentato nel capitolo 4 verranno, dunque, utilizzate per decidere quale delle differenti soluzioni disponibili adottare nell'implementazione reale dei chip, in base al grado di efficienza e robustezza dimostrato da ciascuna delle configurazioni analizzate.

Infine, sempre utilizzando la descrizione fornita da SimPix, ho svolto uno studio sull'impatto di eventuali inefficienze del rivelatore a pixel sulle informazioni di carattere fisico da esso ricostruite. Tali ricadute sono state caratterizzate tramite lo studio dell'efficienza di un algoritmo di selezione "on line" di getti prodotti nel decadimento di adroni contenenti quark b (b -tagging), descritto nel capitolo 5. Questa scelta è motivata dall'elevata precisione spaziale necessaria, per tale tipo di studi, sulla posizione dei vertici di decadimento secondari. Siccome tale precisione può essere garantita esclusivamente dal rivelatore a pixel, l'algoritmo di b -tagging utilizzato si basa unicamente sulle informazioni da esso prodotte, mostrando, così, un'elevata sensibilità rispetto ad eventuali inefficienze riscontrate nell'acquisizione dati. Questa seconda parte del lavoro, descritta nel capitolo 6, oltre a raffinare la caratterizzazione del comportamento del rivelatore a pixel già ottenuta nella prima parte, ha, quindi, l'obiettivo di fornire una dettagliata valutazione dell'impatto fisico delle sue inefficienze su uno dei settori di studio che maggiormente ne risentono.

Capitolo 1

LHC e ATLAS

In questo capitolo vengono elencate le caratteristiche principali dell'acceleratore di particelle LHC e dell'esperimento ATLAS. In particolare, sono discussi i parametri più significativi del progetto di LHC e sono brevemente descritte le singole parti di cui è composto il rivelatore di ATLAS.

1.1 LHC

1.1.1 Caratteristiche generali

Lo scopo di LHC (Large Hadron Collider) è quello di aprire una nuova frontiera in fisica delle particelle, grazie a caratteristiche quali energia di collisione e luminosità, molto più elevate di quelle degli acceleratori attualmente in funzione. In particolare, siccome i risultati di precedenti esperimenti ed i calcoli teorici sembrano indicare che nuovi fenomeni fisici e risposte a problemi ancora irrisolti in fisica delle particelle possano essere trovati ad energie dell'ordine del TeV, LHC deve offrire la possibilità di raggiungere tali energie.

LHC, a questo scopo, è stato progettato per essere utilizzato come un acceleratore protone-protone in grado di garantire 14 TeV di energia nel centro di massa dei fasci ed una luminosità di $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

La scelta di accelerare e far collidere due fasci di protoni, sebbene non sia quella di più semplice realizzazione, è stata una scelta obbligata. L'ipotesi di accelerare fasci di elettroni, come attualmente avviene a LEP (Large Electron Positron collider), è stata scartata a causa delle proibitive perdite di energia per emissione di radiazione di sincrotrone che si avrebbero in tal caso. Infatti, una macchina circolare ad elettroni, per operare ad energie dell'ordine del TeV senza risentire eccessivamente di tali perdite, avrebbe bisogno di un raggio di curvatura talmente elevato da renderne impossibile la realizzazione pratica. Siccome la radiazione di sincrotrone emessa diminuisce, a parità di energia e di raggio di curvatura della traiettoria, all'aumentare della massa delle particelle, tale problema non si pone, invece,

nel caso vengano accelerate particelle molto più pesanti, come i protoni. Detto ciò, un'altra possibilità poteva essere quella di far collidere un fascio di protoni con uno di antiprotoni. In questo caso, si sarebbe potuta anche sfruttare la notevole semplificazione dovuta al fatto che due fasci composti da particelle aventi egual massa ma carica opposta possono essere accelerati in opposte direzioni utilizzando lo stesso campo magnetico curvante. Ma anche tale ipotesi è stata scartata, questa volta per l'impossibilità di reperire una sorgente di antiprotoni abbastanza intensa da consentire una densità dei pacchetti sufficiente a garantire la luminosità richiesta.

L'elevato valore della luminosità di progetto di LHC è necessario per mantenere, anche ad altissime energie, un numero di eventi tale da consentire sia un'elevata precisione su misure di quantità fisiche già note, sia una significativa probabilità di osservare fenomeni caratterizzati da una bassa sezione d'urto. Siccome, infatti, il numero di collisioni per secondo è proporzionale al prodotto della luminosità per la sezione d'urto totale tra le particelle, al crescere dell'energia E dei fasci, la luminosità deve aumentare in ragione di E^2 . Ciò è dovuto al fatto che, al crescere dell'energia E , la lunghezza d'onda di De Broglie associata ad una particella decresce come $1/E$ e, quindi, la corrispondente sezione d'urto decresce come $1/E^2$.

Questo è il motivo per cui la luminosità di progetto di LHC deve essere un paio di ordini di grandezza più grande rispetto a quella degli acceleratori operanti attualmente. Tale obiettivo sarà raggiunto riempiendo ciascuna delle due cavità di LHC con 2835 pacchetti di 10^{11} particelle ciascuno e facendo incrociare i fasci ogni 25 ns. In questo modo, avendo in media 23 interazioni protone-protone per ogni incrocio dei fasci, si otterranno circa 10^9 interazioni al secondo.

In realtà, a causa della complessità del progetto, all'avviamento di LHC seguirà una fase di circa due anni, durante la quale l'acceleratore verrà fatto funzionare a luminosità ridotta ($10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), per consentire di superare gli eventuali problemi di messa a punto e di calibrazione. Questa fase, dal punto di vista scientifico, verrà utilizzata per compiere misure di precisione, sfruttando il minor numero di processi di fondo e, quindi, il rapporto segnale/fondo maggiore rispetto alle condizioni di alta luminosità.

Benché la modalità di impiego fin qui descritta sarà quella principale, nonché quella nella quale vengono riposte maggiori speranze di effettuare scoperte scientifiche, LHC non è limitato ad essere utilizzato per accelerare due fasci di protoni, ma è progettato per un uso molto più versatile. Infatti, sarà anche possibile utilizzarlo per accelerare e far collidere fasci di ioni pesanti, ad esempio di piombo, con un'energia totale di collisione superiore a 1.250 TeV, circa trenta volte maggiore di quella prevista per il RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) del laboratorio di Brookhaven, negli Stati Uniti.

Come si può vedere in figura 1.1, sono attualmente previsti quattro esperimenti per studiare le collisioni che avverranno ad LHC.

ATLAS e CMS, studiando collisioni protone-protone, si prefiggono, princi-

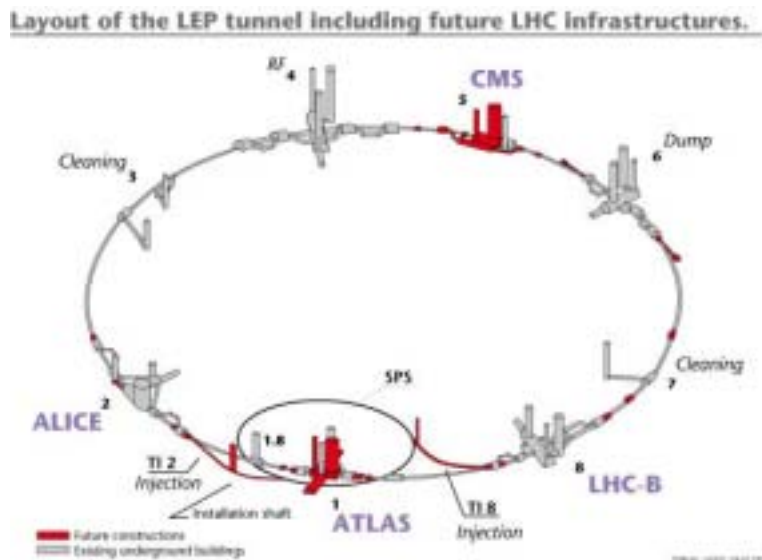


Figura 1.1: Anello di LHC. In figura sono riportati anche i siti che ospiteranno i differenti esperimenti previsti.

palmente, di ottenere informazioni in grado di confermare la validità del cosiddetto “Modello Standard” delle interazioni fondamentali, e di indicare eventuali necessarie estensioni. Obiettivo primario di entrambi gli esperimenti è, in questo contesto, la ricerca di particelle non ancora osservate sperimentalmente, sebbene previste teoricamente, come il bosone di Higgs. Ma questi due esperimenti, di carattere molto generale, avranno anche l’opportunità di migliorare la precisione delle misure in settori della fisica delle particelle già noti.

In particolare, CMS (Compact Muon Solenoid) è un esperimento basato su una precisa identificazione e misura, tramite spettrometri di muoni e calorimetri elettromagnetici, dei muoni, fotoni ed elettroni prodotti nelle collisioni protone-protone. La risoluzione in energia per queste particelle sarà migliore dell’1% a 100 GeV. Queste caratteristiche consentiranno a CMS, sia di poter scoprire il meccanismo responsabile della rottura della simmetria elettrodebole, sia di studiare la fisica dei quark top e beauty e del τ , sia di contribuire al programma di misure su collisioni di ioni pesanti.

Una più dettagliata descrizione dell’esperimento ATLAS è presentata, invece, nel paragrafo 1.2.

LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment), invece, sempre osservando collisioni protone-protone, focalizzerà la propria attenzione su eventi contenenti quark beauty, per studiarne la fisica e trarne informazioni riguardanti la violazione di CP. L’esperimento sarà equipaggiato con un rivelatore di vertice, due RICH (Ring Imaging CHerenkov), un sistema per il tracciamento delle particelle, calorimetri adronici e elettromagnetici e spettrometri

Energia nel centro di massa	7 TeV
Campo di dipolo curvante (a 7 TeV)	8.65 T
Luminosità	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Corrente	0.56 A
Separazione spaziale tra i pacchetti	7.48 m
Separazione temporale tra i pacchetti	24.95 ns
Numero di particelle per pacchetto	$1.1 \cdot 10^{11}$
Angolo di incidenza tra i fasci	300 μrad
Tempo di permanenza dell'alta luminosità	10 h
Energia persa in un giro	6.7 keV
Separazione tra i fasci	194 mm

Tabella 1.1: Principali caratteristiche di LHC.

di muoni.

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) sarà un esperimento dedicato allo studio della fisica degli ioni pesanti, in grado di sfruttare le potenzialità delle interazioni nucleo-nucleo che si avranno all'energia di LHC. L'obiettivo principale è quello di studiare la fisica delle interazioni forti a densità di energia mai raggiunte, condizione in cui è prevista la formazione di un nuovo stato della materia, il plasma di quark e gluoni. L'esistenza di tale stato di aggregazione e le sue proprietà sono un punto cardine per la comprensione di molti aspetti della QCD (Quantum Chromo Dynamics) come, ad esempio, il confinamento dei quark.

1.1.2 Caratteristiche costruttive

Il principale vincolo, nella progettazione di LHC, è quello imposto dalla necessità di riutilizzare il tunnel che attualmente ospita l'anello principale di LEP. Questa scelta, se da un lato limita drasticamente i costi ed i tempi necessari per la costruzione di LHC, rendendola così attuabile praticamente, d'altro canto comporta un notevole impegno tecnologico nel campo dei magneti superconduttori. Infatti, utilizzando un anello come quello di LEP, con un raggio di curvatura di 3100 m, per riuscire ad accelerare un fascio di protoni fino ad un'energia di 7 TeV, è necessario utilizzare magneti in grado di garantire un campo curvante di 8.65 T, valore quasi al limite delle attuali possibilità tecnologiche.

In tabella 1.1 sono brevemente riassunte le principali caratteristiche dell'acceleratore LHC. Sempre per quel che riguarda il sistema di magneti superconduttori di LHC, un'altra particolarità è quella legata alla scelta di accelerare due fasci di protoni, anziché un fascio di protoni e uno di antiprotoni. La seconda soluzione avrebbe consentito, infatti, come già detto, di sfruttare

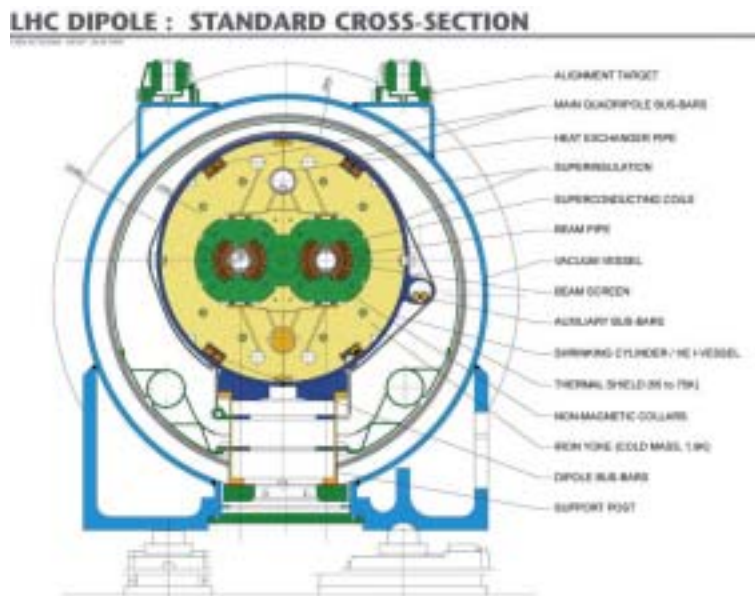


Figura 1.2: Vista in sezione del sistema di magneti di LHC. In figura si possono osservare le cavità entro le quali verranno accelerati, separatamente, i due fasci di protoni.

il fatto che protoni e antiprotoni, avendo uguale massa, ma opposta carica elettrica, possono essere accelerati in direzioni opposte lungo la stessa traiettoria, utilizzando un singolo anello di magneti. Nel caso di LHC, invece, è necessario prevedere due distinte cavità, all'interno di ciascuna delle quali verrà accelerato un singolo fascio di protoni. Questa soluzione è mostrata in figura 1.2, in cui è raffigurata una sezione dei magneti superconduttori di LHC.

I due fasci, dunque, viaggeranno costantemente separati all'interno dell'anello di LHC, per essere poi deviati l'uno contro l'altro, con un angolo di incidenza di $300 \mu\text{rad}$, nei quattro punti in cui verranno installati gli esperimenti.

Come tutte le grandi macchine acceleratrici, LHC ha bisogno di acceleratori di supporto che fungano da iniettori. Questa funzione è delegata ad una serie di macchine già presenti ed attualmente in funzione al CERN. In tabella 1.2 è riassunta la catena di accelerazione attraverso la quale passeranno i fasci di protoni e quelli di ioni pesanti; per ciascuna macchina elencata è riportata la massima energia a cui è in grado di accelerare i pacchetti. Lo stesso schema è illustrato graficamente in figura 1.3, dove sono mostrati i differenti percorsi previsti per l'accelerazione di protoni e ioni pesanti.

PROTONI		IONI PESANTI	
Acceleratore	Energia	Acceleratore	Energia
RFQ	750 keV	RFQ	
Linac 2	50 MeV	Linac 3	4.2 MeV/u
PS Booster	1.4 GeV	LEIR	14.8 MeV/u
PS	25 GeV	PS	4.25 GeV/u
SPS	450 GeV	SPS	177 GeV/u
LHC	7 TeV	LHC	2.8 TeV/u

Tabella 1.2: Catena di iniezione ad LHC.

LHC: HADRON INJECTOR COMPLEX

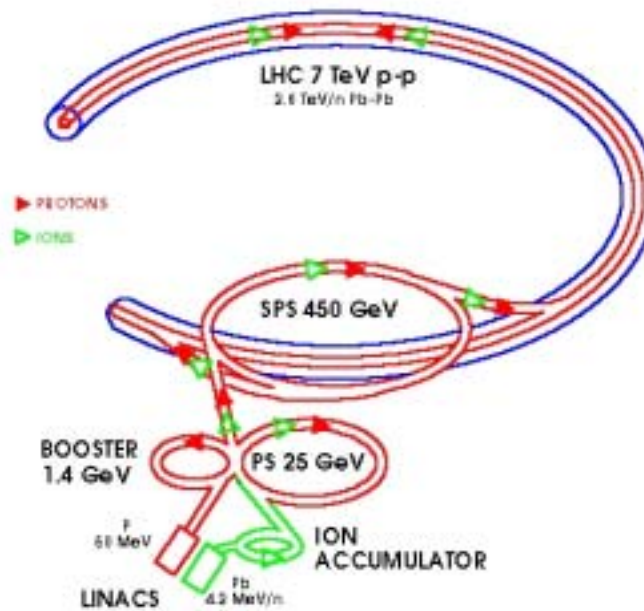


Figura 1.3: Catena di iniezione di LHC. In figura sono riportati i percorsi previsti sia per i fasci di protoni, sia per quelli di ioni pesanti.

1.2 ATLAS

1.2.1 Caratteristiche generali

ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS), come già detto nei paragrafi precedenti, è uno dei quattro esperimenti che verranno installati ad LHC e, in particolare, è dedicato allo studio delle collisioni tra fasci di protoni.

ATLAS è un esperimento ad ampio raggio, progettato per ottenere la maggiore versatilità possibile e per operare in differenti settori della fisica delle particelle. Sebbene vi sia una lunga serie di misure e di indagini che si prevede di eseguire ad LHC, esiste comunque la possibilità che fenomeni non attesi possano richiedere misure che al momento non sono previste. Uno degli obiettivi primari di ATLAS è, dunque, quello di poter effettuare misure di buona precisione, non solo su eventi fisici previsti, ma anche su eventuali fenomeni nuovi. Per ottenere questo risultato, il rivelatore deve essere progettato mantenendo un atteggiamento, per così dire, “ingenuo”, ovvero non dipendente da specifici modelli teorici, nei confronti della fisica. Deve essere in grado di fornire una buona precisione nell’identificazione e nella misura delle quantità cinematiche di tutti i tipi di particelle che si possono produrre nelle collisioni protone-protone ad LHC.

A questo scopo, il rivelatore di ATLAS è studiato per soddisfare le seguenti richieste:

- eccellente precisione dei calorimetri elettromagnetici, per l’identificazione e la misura di elettroni e fotoni; calorimetri adronici a copertura spaziale totale, per accurate misure dei getti prodotti nell’adronizzazione di quark (jet) e dell’energia trasversa mancante;
- identificazione dei muoni e precisa misura del loro impulso, con la capacità di effettuare misure accurate alla massima luminosità, utilizzando esclusivamente lo spettrometro di muoni esterno;
- efficiente ricostruzione di traccia ad elevata luminosità, per effettuare misure su leptoni con elevato impulso trasverso, per l’identificazione di elettroni, fotoni, leptoni τ e adroni contenenti quark pesanti, e per avere una capacità di ricostruzione completa degli eventi a bassa luminosità;
- grande accettazione in pseudorapidità (η), con copertura quasi totale dell’angolo azimutale (ϕ) su tutto il rivelatore. L’angolo azimutale è misurato attorno all’asse del fascio (asse Z), mentre la pseudorapidità è legata all’angolo polare (θ) misurato a partire dalla direzione del fascio dalla relazione $\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$. Tale variabile viene comunemente utilizzata al posto di θ , in quanto la sezione d’urto adronica risulta piatta rispetto ad essa;
- meccanismo di trigger di primo livello realizzato tramite soglie a basso impulso trasverso, in modo da garantire un’elevata efficienza nella maggior parte dei processi fisici interessanti prodotti ad LHC.

Il rivelatore di ATLAS è composto da tre parti fondamentali: l’Inner Detector, la più interna, progettata per tracciare con precisione le traiettorie delle particelle e misurarne l’impulso; una serie di calorimetri elettromagnetici e

adronici; uno spettrometro di muoni.

Un altro elemento fondamentale è il sistema di magneti superconduttori, in grado di fornire il campo necessario a curvare le traiettorie delle particelle prodotte nelle collisioni protone-protone.

Nei paragrafi seguenti verranno brevemente descritti ciascuna di queste parti ed il sistema di trigger e acquisizione dati.

1.2.2 Il sistema di magneti

Il sistema di magneti superconduttori di ATLAS è composto da un solenoide centrale, che fornisce il campo magnetico per l'Inner Detector, e da un sistema di tre grandi toroidi, di cui due sono posti alle esteriorità laterali del rivelatore ed uno centralmente attorno al magnete solenoidale, che generano il campo magnetico per lo spettrometro di muoni.

Il magnete solenoidale fornisce un campo di 2 T, con un massimo, in prossimità del magnete stesso, di 2.6 T; il toroide centrale ed i due laterali generano, invece, rispettivamente, un campo di 3.9 e 4.1 T.

I magneti, raffreddati indirettamente tramite un flusso forzato di elio a 4.5 K, sono alimentati da generatori da 21 kA nel caso dei toroidi e da 8 kA per il solenoide centrale.

1.2.3 L'Inner Detector

La funzione dell'Inner Detector (ID) è quella di ricostruire con grande efficienza le tracce cariche ed i vertici presenti negli eventi, contribuendo, assieme ai calorimetri ed allo spettrometro di muoni, al riconoscimento di elettroni, fotoni e muoni, e fornendo informazioni sui vertici di decadimento delle particelle con breve vita media.

Le richieste per la risoluzione sull'impulso, misurato tramite la curvatura nel campo magnetico solenoidale, e sui vertici richiedono misure di alta precisione, effettuate con rivelatori di elevata granularità, a causa della grande densità di tracce prevista ad LHC. A questo scopo, l'Inner Detector, completamente racchiuso all'interno del solenoide centrale, è composto da rivelatori ad alta risoluzione, posti nelle immediate vicinanze del fascio, e di elementi traccianti continui, situati più esternamente.

Il rivelatore a pixel

Nella parte più interna dell'Inner Detector di ATLAS viene utilizzata la tecnologia dei pixel di silicio, perché questa è l'unica soluzione in grado di garantire una buona ricostruzione di traccia nelle vicinanze del centro di interazione, in condizioni di elevato irraggiamento.

La principale funzione del rivelatore a pixel è quella di garantire un'efficace ricostruzione delle tracce e dei vertici presenti in un evento. A tal fine, la

geometria del rivelatore, descritta in dettaglio nel paragrafo 3.1, è strutturata in tre piani centrali (barrel) e tre dischi (end-cap), posti ad entrambe le estremità in avanti. In tal modo, per ogni traccia sono garantiti tre precisi punti nello spazio, dai quali può esserne ricostruito un segmento, indipendentemente dalle informazioni degli altri rivelatori. Inoltre, il contributo del rivelatore a pixel è indispensabile nel cosiddetto b-tagging (c-tagging, τ -tagging), cioè nella capacità di distinguere i jet prodotti da quark b (quark c, τ) di elevato impulso trasverso da jet gluonici o da quelli prodotti da quark leggeri. Tale tipo di selezione è basata sulla precisa misura della minima distanza delle tracce ricostruite rispetto al vertice di interazione (parametro d’impatto), per la quale è indispensabile sfruttare l’elevata risoluzione spaziale garantita dal rivelatore a pixel. L’obiettivo che si desidera raggiungere tramite tali selezioni, è un’efficienza del 50% con un fattore di reiezione pari a 100 per i jet da quark leggeri.

Dal punto di vista strutturale, come già detto, il rivelatore a pixel è formato da una parte centrale, composta da tre cilindri di raggio medio pari a 5.05, 8.75 e 12.25 cm rispettivamente, e da tre dischi, di raggio medio pari a 17 cm, posti a ciascuna estremità del barrel in modo da completare la copertura angolare. Il sistema è strutturato in più di 1700 moduli di superficie pari a $6.28 \times 2.2 \text{ cm}^2$, di cui circa 1400 sono contenuti nel barrel e 300 nei dischi. Alla lettura dei pixel, procedura descritta in dettaglio nel capitolo 3, sono dedicati, in ogni modulo, 16 chip di front-end. Le informazioni immagazzinate dai 16 front-end vengono poi inviate ad un circuito integrato di controllo, l’MCC (Module Controller Chip), interfacciato con i buffer di uscita del rivelatore.

Il SemiConductor Tracker

Il SemiConductor Tracker (SCT) è progettato allo scopo di fornire, per ogni traccia, otto precisi punti spaziali nella regione intermedia dell’Inner Detector, contribuendo, così, alla ricostruzione delle tracce, alle misure di impulso e parametro di impatto ed alla identificazione dei vertici.

Il barrel dell’SCT utilizza otto piani di rivelatori a microstrip di silicio per ottenere una misura di precisione delle coordinate, sia in z , cioè nella direzione del fascio, sia nella direzione $R\phi$. Ogni elemento sensibile misura $6.36 \times 6.40 \text{ cm}^2$ e contiene 768 microstrip, ciascuna delle dimensioni di $80 \mu\text{m}$. La misura della coordinata z viene effettuata in maniera stereoscopica, cioè affacciando due piani di rivelatori in modo che le microstrip da essi contenute formino un angolo di 40 mrad. I moduli contenuti negli end-cap sono molto simili per costruzione, ma utilizzano elementi di dimensioni inferiori, allineati radialmente.

L’elettronica di lettura dei moduli dell’SCT consiste in un amplificatore di front-end e in un discriminatore, seguiti da una memoria in grado di immagazzinare temporaneamente gli hit sopra soglia fino all’arrivo della decisione

del trigger di primo livello.

L'intero SCT contiene 61 m^2 di rivelatori di silicio, per un totale di 6.2 milioni di canali di output. La risoluzione spaziale è di $16 \mu\text{m}$ in $R\phi$ e $580 \mu\text{m}$ in z ; come conseguenza, due tracce possono essere distinte a patto che distino più di $\sim 200 \mu\text{m}$.

Il Transition Radiation Tracker

Il Transition Radiation Tracker (TRT) è basato sull'uso di rivelatori a tubi, particolarmente adatti alle difficili condizioni di LHC, in quanto intrinsecamente resistenti alle radiazioni ed in grado di fornire un elevato numero di punti, tipicamente 36, per ogni traccia.

Il barrel, che copre una regione di raggio compreso tra 56 a 107 cm, contiene circa 50000 tubi, ciascuno separato in due parti, in modo da ridurre l'occupazione dell'elettronica di lettura. Gli end-cap, invece, contengono 320000 tubi diretti radialmente, da cui le informazioni vengono scaricate all'estremità più esterna. Il numero complessivo di canali di uscita risulta, così, pari a 420000.

Ciascun tubo ha un diametro di 4 mm e contiene un filo sensibile di $30 \mu\text{m}$ di diametro; ogni canale, tramite la misura del tempo di drift, garantisce una risoluzione spaziale di $170 \mu\text{m}$ e due soglie indipendenti.

1.2.4 I calorimetri

I calorimetri, al contrario di quanto accade ad altri rivelatori come, per esempio, agli spettrometri magnetici, aumentano la propria risoluzione intrinseca al crescere dell'energia delle particelle incidenti. Questa caratteristica li rende particolarmente adatti per essere utilizzati in esperimenti di fisica delle altissime energie. In particolare, ad LHC i calorimetri saranno di cruciale importanza in molte misure e nella ricostruzione di canali fisici di interesse primario.

I principali compiti dei calorimetri nell'esperimento ATLAS sono: precisa misura dell'energia e della posizione di elettroni e fotoni; misure dell'energia e della direzione dei jet, e dell'impulso trasverso mancante dell'evento; identificazione delle particelle, distinguendo, ad esempio, elettroni e fotoni da adroni e jet, e prodotti dei decadimenti adronici del τ dai jet; selezione di eventi per il trigger.

Raggiungere questi obiettivi è particolarmente impegnativo, a causa delle caratteristiche di progetto di LHC. L'elevata energia nel centro di massa richiede una buona prestazione su un intervallo di energie che si estende da pochi GeV fino all'ordine del TeV. Siccome alla luminosità di progetto si avranno più di venti collisioni protone-protone ogni 25 ns, i calorimetri devono avere una risposta molto rapida e una granularità molto fine. Per far fronte all'enorme flusso di particelle atteso in un periodo di esercizio di

almeno dieci anni è, infine, necessaria una buona resistenza alle radiazioni. Il sistema di calorimetri di ATLAS circonda l'Inner Detector ed è, a sua volta, racchiuso dallo spettrometro di muoni. Tale sistema consiste in calorimetri ad argon liquido (LAr), che compongono sia la parte elettromagnetica sia quella adronica, e in un grande calorimetro adronico a piastre scintillanti, posto più esternamente. Nella parte centrale è, inoltre, presente un piano precampionatore a LAr. Questo ulteriore rivelatore, posto a contatto con il criostato del magnete solenoideale che fornisce il campo magnetico all'Inner Detector, ha lo scopo di misurare l'energia persa dalle particelle nei rivelatori traccianti.

La risoluzione energetica di progetto, ad un'energia E espressa in GeV, è di $10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$ per il calorimetro elettromagnetico, di $50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ per la parte centrale del calorimetro adronico e di $100\%/\sqrt{E} \oplus 10\%$ per i settori in avanti del calorimetro adronico.

1.2.5 Lo spettrometro di muoni

Una sicura e precisa misura dell'impulso dei muoni è di cruciale importanza per la comprensione dei fenomeni fisici che avverranno ad LHC. Tale misura deve poter essere effettuata per muoni la cui energia vari in un intervallo che va dai pochi GeV che si hanno, ad esempio, nel caso di eventi contenenti adroni del quark b , fino a qualche TeV, energia alla quale potrebbero emergere fenomeni fisici mai osservati.

A questo scopo, ATLAS è equipaggiato con uno spettrometro di muoni, il cui funzionamento è basato sulla deflessione magnetica delle traiettorie dei muoni da parte dei tre grandi magneti superconduttori toroidali. Il corretto funzionamento di questo rivelatore dipende, inoltre, dall'azione filtrante svolta dai calorimetri adronici ed elettromagnetici. Infatti, le uniche particelle in grado di attraversarli senza esserne assorbite sono i muoni di impulso superiore ai 3 GeV/c.

Per migliorare la risoluzione sulla misura dell'impulso trasverso (p_T) quando questo risulta inferiore ai 100 GeV/c, la traccia ricostruita dello spettrometro viene estrapolata all'indietro fino ad individuare la sua corrispondente nell'Inner Detector. A questo punto vengono combinate le due tracce e, di conseguenza, anche le informazioni da esse contenute sulle quantità cinematiche della particella che le ha prodotte. Per effettuare tale combinazione sono attualmente valutate due strategie complementari: la prima è basata sulla combinazione statistica dei parametri ottenuti indipendentemente dalle due tracce; la seconda consiste in una procedura di fit sulla traccia complessiva, composta da tutti i punti rivelati dall'Inner Detector e dallo spettrometro di muoni. In entrambi i casi si riesce ad ottenere una risoluzione inferiore al 2% per $p_T < 100$ GeV/c, e di circa il 10% per valori di p_T attorno ad 1 TeV/c. Il confronto fra le tracce registrate indipendentemente dall'Inner Detector e dallo spettrometro di muoni consente, inoltre, di di-

stinguere e di scartare i muoni prodotti in interazioni secondarie, così come anche quelli provenienti dal decadimento “in volo” di mesoni π e K .

Lo spettrometro a muoni ricopre, infine, un ruolo molto importante per il trigger. Per poter essere, quindi, in grado di generare un segnale entro 25 ns dall’arrivo delle particelle, oltre ad essere equipaggiato con camere traccianti ad alta precisione spaziale, esso è dotato anche di rivelatori meno precisi, ma di più rapida risposta.

1.2.6 Il sistema di trigger e acquisizione dati

La funzione del sistema di trigger è quello di selezionare gli eventi ritenuti interessanti, per poterli salvare e, successivamente, analizzare.

Il sistema di trigger di ATLAS deve essere in grado di far fronte a 10^9 interazioni al secondo, riuscendo a selezionare con grande efficienza rari eventi fisici di interesse scientifico, scartando processi di fondo di ben maggiore sezione d’urto e gestendo l’enorme numero di canali (ordine di 10^7) provenienti dai grandi e complessi rivelatori.

La strategia di trigger di ATLAS prevede una riduzione su tre livelli successivi della frequenza degli eventi: primo livello (LVL1), secondo livello (LVL2) ed Event Filter (EF). Al fondo della catena di decisioni, la frequenza con cui possono essere immagazzinati gli eventi è limitata a circa 100 Hz, a causa di limiti pratici nella potenza di calcolo e nella capacità di archiviazione. La dimensione media di un intero evento è, infatti, di circa 1 MByte, il che comporta, lavorando a 100 Hz, la necessità di immagazzinare 360 GB/h. In figura 1.4 è riportato lo schema a blocchi del sistema di trigger ed acquisizione dati di ATLAS.

Il trigger di primo livello opera una selezione iniziale degli eventi, utilizzando informazioni di precisione ridotta provenienti dai calorimetri e dalle camere a μ . Le decisioni del trigger di LVL1 sono basate sulla selezione di oggetti quali muoni, elettroni e fotoni di elevato impulso trasverso, jet, adroni prodotti dal decadimento di leptoni τ , energia mancante o energia trasversa molto grandi. La massima frequenza di uscita del sistema di trigger di primo livello deve essere di 100 kHz, in quanto questa è la massima frequenza che i sistemi di front-end dei rivelatori sono in grado di accettare. Infine, il tempo di latenza previsto, cioè il tempo necessario a prendere e propagare una decisione, è di $2 \mu\text{s}$, rendendo necessario memorizzare temporaneamente i dati prodotti dai rivelatori, fino a quando il trigger non abbia deciso se selezionare o meno l’evento a cui fanno riferimento.

Tutti i dati riguardanti gli eventi selezionati da LVL1 vengono, a questo punto, temporaneamente immagazzinati in buffer di uscita, detti ROB (Read Out Buffers), per essere analizzati dal trigger di secondo livello. Il trigger di LVL2, basandosi sulle misure provenienti da tutto il rivelatore e sulle indicazioni fornite dal LVL1, opera un’ulteriore selezione, fino a ridurre la frequenza degli eventi selezionati a ~ 1 kHz, con un tempo di latenza di 1-10

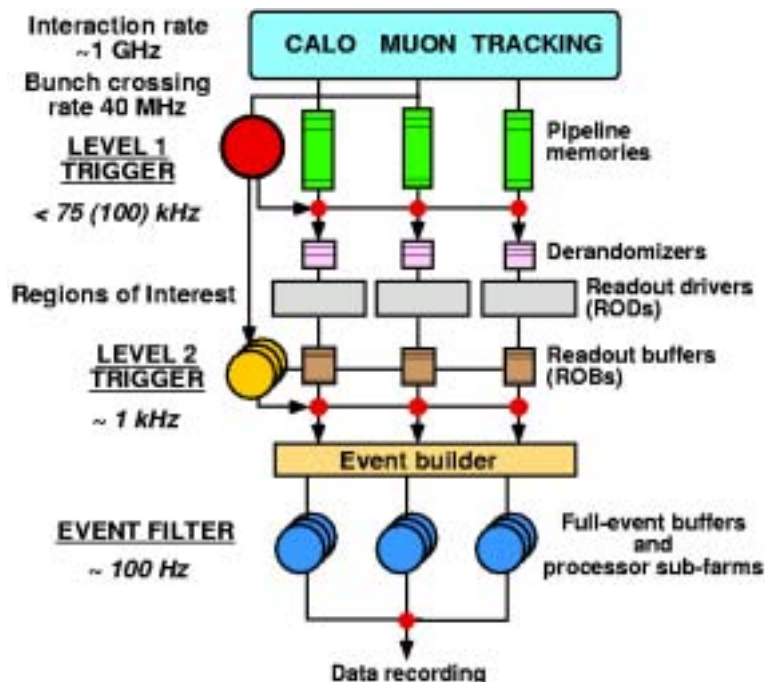


Figura 1.4: Schema a blocchi del sistema di trigger ed acquisizione dati di ATLAS. Sono riportati i tre successivi livelli di selezione degli eventi e le loro rispettive frequenze di uscita.

ms.

L'ultima parte della selezione in tempo reale viene effettuata dall'Event Filter, dopo che gli eventi selezionati dal trigger di secondo livello sono stati scaricati dai ROB e completamente ricomposti. In questa fase, grazie alla maggiore disponibilità di tempo, possono essere utilizzati algoritmi e metodi analoghi a quelli di analisi offline, opportunamente adattati per essere eseguiti in tempo reale. Un esempio è la ricostruzione di vertici e tracce per gli elettroni, che può essere effettuata tenendo conto del fenomeno della bremsstrahlung. Dopo quest'ultimo passo della selezione, la frequenza di uscita viene ridotta a $\sim 100 \text{ Hz}$.

Capitolo 2

La fisica ad ATLAS

In questo capitolo vengono brevemente illustrati i diversi settori della fisica in cui ATLAS intende operare.

2.1 Il Modello Standard

La teoria delle interazioni tra costituenti fondamentali della materia che meglio concorda con quanto osservato sperimentalmente alle massime energie finora raggiunte, è il cosiddetto Modello Standard (SM). Tale teoria, basata sul formalismo generale di una teoria dei campi quantistici relativistici, descrive le interazioni tra fermioni puntiformi di spin $1/2$, mediate da bosoni di gauge di spin 1.

Le particelle elementari previste dal Modello Standard sono elencate nelle tavole 2.1 e 2.2 insieme alle loro proprietà fondamentali.

Famiglia	Leptoni			Quark		
	Sapore	Carica (e)	Massa (GeV/c ²)	Sapore	Carica (e)	Massa (GeV/c ²)
1 ^a	ν_e	0	$< 5 \cdot 10^{-9}$	u	2/3	$2 \div 8 \cdot 10^{-3}$
	e	-1	$511 \cdot 10^{-6}$	d	-1/3	$5 \div 15 \cdot 10^{-3}$
2 ^a	ν_μ	0	$< 0.3 \cdot 10^{-3}$	c	2/3	1.0 \div 1.6
	μ	-1	$106 \cdot 10^{-3}$	s	-1/3	0.1 \div 0.3
3 ^a	ν_τ	0	< 0.03	t	2/3	176 ± 13
	τ	-1	1.777	b	-1/3	4.1 \div 4.5

Tabella 2.1: fermioni fondamentali (spin $\frac{1}{2}$) nel Modello Standard, con la loro carica e massa. In aggiunta alle particelle mostrate nella tabella, ogni fermione ha una corrispondente antiparticella con la stessa massa e lo stesso spin ma carica opposta, e tutti i quark appaiono in tre colori.

Le interazioni fondamentali sono descritte tramite una teoria di gauge basata sul gruppo

Interazione	Forza	Bosone	Carica (e)	Massa (GeV/c^2)
Elettromagnetica	$\alpha = 1/137$	γ	0	0
Debole	$\alpha_w = 1.02 \cdot 10^{-5}$	W^\pm	± 1	80.22 ± 0.26
		Z^0	0	91.187 ± 0.007
Forte	$\alpha_s \sim 0.1 \dots 1$	8 gluoni	0	0

Tabella 2.2: interazioni e corrispondenti bosoni di gauge (spin 1) nel Modello Standard. L'intensità di ogni interazione è parametrizzata da una costante di accoppiamento adimensionale.

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$$

dove $SU(3)$ è il gruppo che descrive la cosiddetta simmetria di colore, dal quale vengono generati otto bosoni di gauge, detti gluoni, mediatori delle interazioni forti, mentre $SU(2) \otimes U(1)$ è il gruppo tramite il quale sono descritte le interazioni deboli ed elettromagnetiche.

2.1.1 Il meccanismo di Higgs

La Lagrangiana scritta sulla base della simmetria $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ prevede, però, particelle di massa nulla, in quanto non contiene termini di massa. Tali termini non possono essere introdotti esplicitamente, in quanto violerebbero la simmetria di gauge della teoria, rendendo quest'ultima non rinormalizzabile e facendole perdere la predicibilità.

Per motivare le masse delle particelle viene, quindi, ipotizzato il meccanismo della rottura spontanea di simmetria, il quale prevede, in generale, che una simmetria data, pur restando valida per la Lagrangiana che descrive la teoria, non lo sia per lo stato di vuoto.

In particolare, per riprodurre le masse delle particelle note del Modello Standard, viene introdotta una particella scalare, il bosone di Higgs, con valore di aspettazione sul vuoto v diverso da zero. Introducendo tale particella si ha la rottura spontanea

$$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1) \rightarrow SU(3)_c \otimes U(1)_Q$$

dove c indica il colore, numero quantico delle interazioni forti, caratterizzate dalla costante di accoppiamento α_s , e Q è la carica elettrica.

A causa della rottura spontanea di simmetria i tre bosoni vettori della simmetria $SU(2)$ e il bosone della simmetria $U(1)$ si “miscelano” per dare altre quattro particelle di spin 1, W^\pm , Z^0 ed il fotone γ , di massa pari a

$$M_{W^\pm} = \frac{1}{2}gv, \quad M_Z = M_{W^\pm}/\cos\theta_W, \quad M_\gamma = 0$$

In seguito alla rottura spontanea anche i quarks ed i leptoni acquistano massa proporzionalmente alla loro costante di interazione con il bosone di Higgs.

Per lo stesso motivo il bosone di Higgs si accoppia con le particelle (fermioni e bosoni) con intensità proporzionale alla loro massa.

La massa del bosone di Higgs è solo debolmente predetta dalla teoria: le correzioni radiative modificano le relazioni tra le costanti fondamentali $\alpha_s, M_W, \sin\theta_W, g$ per un fattore ΔR proporzionale alla massa del quark top al quadrato e al logaritmo della massa dell'Higgs.

Dal confronto tra i risultati sperimentali e le predizioni teoriche si possono ottenere una determinazione indiretta della massa dell'Higgs ($m_H = 98_{-38}^{+58} GeV/c^2$). Il limite sperimentale sulla massa dell'Higgs, ottenuto dagli esperimenti LEP, è, invece, $m_H > 113.5$ al 95% C.L..

La verifica del Modello Standard e la ricerca di eventuali fenomeni di nuova fisica procede quindi in parallelo: da un parte si verifica la consistenza del modello confrontando le misure sperimentali di precisione con le previsioni teoriche; dall'altra si cerca di evidenziare, in maniera diretta, la produzione delle particelle previste dalla teoria che non sono ancora state osservate.

2.1.2 Estensioni del Modello Standard

Il Modello Standard, sebbene sia pienamente compatibile con quanto finora osservato sperimentalmente, risulta in parte insoddisfacente. Tale modello prevede, infatti, troppi parametri liberi il cui valore non può essere predetto dalla teoria; inoltre, per conferire massa alle particelle, deve essere introdotto "ad hoc" il meccanismo di Higgs.

Vengono quindi studiate teorie che vadano oltre il Modello Standard, tra cui quelle dette supersimmetriche (SUSY). In tali teorie ogni particella possiede un partner che obbedisce ad una statistica differente: ai fermioni corrispondono particelle scalari, mentre i bosoni vettori possiedono partner fermionici. I principali punti a favore delle teorie supersimmetriche sono:

- la sua "naturalità": il termine di massa del campo scalare di Higgs, a causa dell'autointerazione, riceve correzioni radiative che crescono con Λ^2 (Λ scala di energia considerata). Per compensare questo effetto, e mantenere entro limiti ragionevoli la massa dell'Higgs ($< 1 TeV/c^2$), la costante di questa autointerazione deve essere molto piccola (innaturale). Questo problema, comune a tutti i campi scalari, è automaticamente risolto se si suppone l'esistenza un partner fermionico del bosone di Higgs. I contributi al termine di massa, dovuti al termine di autointerazione, per fermioni e scalari si cancellano esattamente.
- La ricerca di una unica teoria fondamentale presuppone che tutte le simmetrie introdotte attualmente nel Modello Standard siano un sottoinsieme di una simmetria più ampia. In questo contesto ci si aspetta che le costanti di accoppiamento delle quattro forze fondamentali convergano all'aumentare dell'energia. In particolare ci si aspetta che

le costanti di accoppiamento dell' interazione forte, debole ed elettromagnetica convergono ad un unico valore ad energie dell'ordine di $10^{16} GeV$.

In ambito non supersimmetrico le costanti non convergono esattamente allo stesso valore mentre con l'introduzione della supersimmetria la convergenza migliora notevolmente.

- Una teoria di campo quantistica dell'interazione gravitazionale è possibile solo in ambito supersimmetrico.

La supersimmetria non può essere, tuttavia, una supersimmetria esatta: non vi è, infatti, evidenza sperimentale dell'esistenza di partner supersimmetrici delle particelle note. Si suppone quindi che la supersimmetria sia una simmetria rotta spontaneamente, con un meccanismo simile a quello dell'Higgs, e che la particelle supersimmetriche abbiano massa più elevata dei loro partner (approssimativamente $m_{SUSY} \in [0.1, 1] TeV/c^2$).

Lo spettro completo della supersimmetria prevede un numero doppio di particelle di materia e di portatori dell'interazione e 5 bosoni di Higgs (3 neutri e due carichi).

Sebbene ad oggi non vi sia nessuna evidenza sperimentale di supersimmetria, il fatto che sia, dal punto di vista teorico, un ingrediente "necessario" spinge gli esperimenti presenti (e futuri) a cercarne le signature previste.

2.2 Obiettivi dell'esperimento ATLAS

L'energia e la luminosità di LHC offrono l'opportunità di effettuare una grande varietà di misure fisiche. Da un lato si punterà ad ottenere una migliore accuratezza nella misura delle proprietà di oggetti fisici già noti come, ad esempio, i bosoni di gauge, ed a confermare la validità del Modello Standard. D'altra parte si cercherà evidenza di fenomeni fisici mai osservati in precedenza, i quali, per essere spiegati, richiedono un'estensione di tale modello.

Il primo tipo di studi verrà condotto soprattutto durante il periodo iniziale di luminosità ridotta. Le misure riguardanti eventuali nuovi fenomeni fisici, richiedendo la massima statistica disponibile, sfrutteranno, invece, la luminosità di progetto di LHC.

2.2.1 Il periodo di luminosità ridotta

Nella fase iniziale di luminosità ridotta verranno prodotti un gran numero di bosoni di gauge e si avranno numerosi processi legati alla QCD ed ai quark pesanti. Questo permetterà di effettuare un gran numero di misure di precisione, sfruttando il rapporto segnale/fondo più favorevole rispetto a quello che si avrà in condizioni di alta luminosità.

Lo studio di processi di QCD ad LHC avrà, fundamentalmente due obiettivi. Innanzitutto, verranno messe alla prova le attuali previsioni e saranno effettuate misure di precisione, in grado di imporre vincoli aggiuntivi, ad esempio, sulla distribuzione dei partoni nel protone, o di fornire misure a varie energie della costante α_s di accoppiamento forte. Inoltre, i processi di QCD costituiranno la parte predominante del fondo per gli altri fenomeni legati al Modello Standard. Quindi, la loro precisa comprensione nella nuova regione cinematica caratteristica di LHC è indispensabile per riconoscere ed estrarne eventuali segnali prodotti da eventi fisici mai osservati finora. Infine, comportamenti che si discostino dalle previsioni teoriche della QCD potrebbero essere una indicazione della presenza di nuovi fenomeni fisici.

Ad LHC, anche a luminosità ridotta, la frequenza di produzione di adroni contenenti quark b (adroni B) sarà enorme, grazie alla grande sezione d'urto adronica per la produzione di coppie $b\bar{b}$. Circa una collisione su cento produrrà una coppia di quark b , quindi la statistica disponibile sarà limitata solamente dalla frequenza a cui i dati possono essere immagazzinati. Il programma di B -fisica proposto è, dunque, molto ampio. Tale programma di lavoro includerà: misure della violazione di CP nei decadimenti dei mesoni B , violazione che, nel Modello Standard, è dovuta esclusivamente ad una fase nella matrice CKM; misure di precisione dei periodi di oscillazione di sapore nei mesoni B_s^0 e B_d^0 e delle relative frequenze di decadimento, imponendo, così, ulteriori vincoli sugli elementi della matrice CKM; ricerca e misura di decadimenti molto rari, fortemente soppressi nel Modello Standard, che, se osservati con frequenza significativamente superiore a quella prevista, produrrebbero un'evidenza indiretta di nuovi fenomeni fisici.

Le previsioni teoriche indicano, inoltre, che ad LHC, durante il periodo di luminosità ridotta, verranno prodotte più di otto milioni di coppie $t\bar{t}$ all'anno. Tale elevata statistica, abbinata all'ottimo rapporto segnale/fondo, fornirà le condizioni ideali per svolgere un dettagliato studio delle proprietà del quark top. Le motivazioni di tale studio sono numerose: innanzitutto, il quark top è l'unico, tra i fermioni fondamentali noti, ad avere una massa dell'ordine della scala elettrodebole. Di conseguenza, l'analisi delle sue proprietà può essere un eccellente strumento di indagine sul meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole; nuovi fenomeni fisici possono essere scoperti studiando sia la sua produzione sia i suoi decadimenti. Inoltre, nel quadro del Modello Standard, una precisa misura della massa del quark top contribuisce a porre ulteriori vincoli sulla massa del bosone di Higgs. In aggiunta a questo, gli eventi contenenti quark t costituiranno buona parte del fondo in molte ricerche di nuovi fenomeni fisici ad energie dell'ordine del TeV; conoscerne la fenomenologia, dunque, sarà indispensabile per svolgere tali studi.

Un altro importante obiettivo, durante le prime fasi operative di ATLAS, sarà misurare la massa del bosone W con una precisione inferiore ai 15 MeV. Grazie ai 300 milioni di eventi con un singolo W che si avranno in un anno

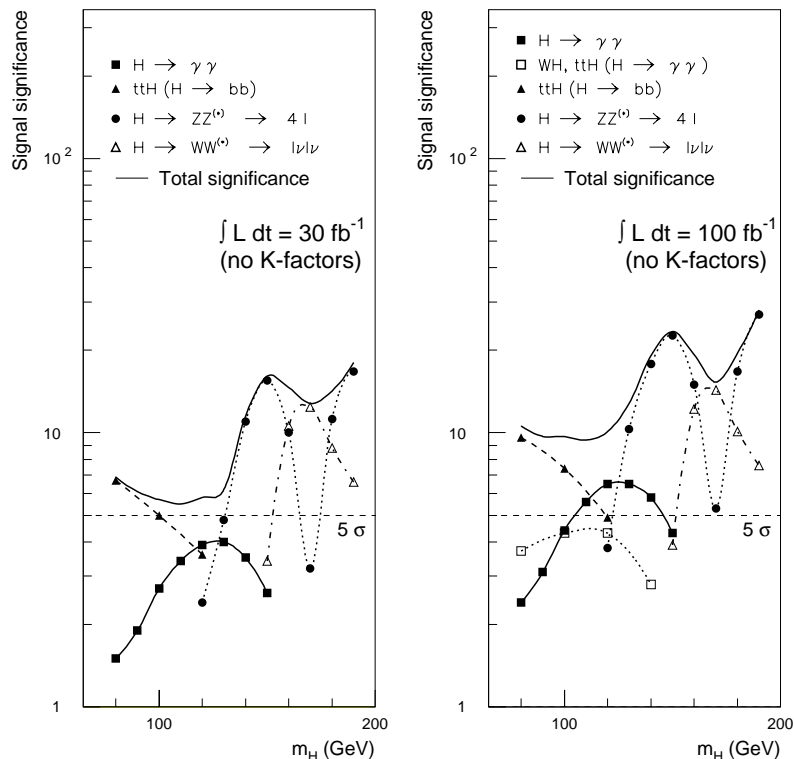


Figura 2.1: Sensibilità di ATLAS alla scoperta del bosone di Higgs del Modello Standard nella regione di massa intermedia. È riportata sia la significatività statistica di ciascuno dei canali studiati, sia quella complessiva.

di misure, l'errore statistico atteso per tale misura è di circa 2 MeV. Quindi, per ottenere la precisione voluta, gli errori sistematici dovranno essere ridotti a meno di 10 MeV. Misure sufficientemente precise della massa del W e del top consentirebbero di vincolare il valore della massa del bosone di Higgs del Modello Standard o del bosone h del MSSM a meno del 30%.

2.2.2 Il periodo di luminosità massima

Nel caso il bosone di Higgs non venga scoperto prima dell'accensione di LHC, la ricerca di tale particella e delle sue possibili estensioni supersimmetriche previste dal MSSM rappresenterà l'attività principale dell'esperimento ATLAS. Le strategie di ricerca prevedono l'utilizzo di più canali di decadimento, la scelta dei quali è indicata dalla frequenza del segnale e dal rapporto segnale/fondo nelle varie regioni di massa.

In figura 2.1 è riportata la sensibilità di ATLAS alla scoperta del bosone di Higgs del Modello Standard nella regione di massa intermedia, nei due differenti casi di luminosità ridotta e di luminosità massima.

I canali utilizzati nel caso del bosone di Higgs del Modello Standard sono:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ da eventi con produzione diretta;
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ da eventi con produzione associata WH , ZH e $t\bar{t}H$, selezionati tramite un leptone (e, μ) proveniente dal decadimento del bosone vettore o del quark top;
- $H \rightarrow b\bar{b}$ da eventi con produzione associata WH , ZH e $t\bar{t}H$, selezionati tramite un leptone (e, μ) e tramite b -tagging;
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$;
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ e $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$;
- $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ e $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$.

L'analisi del settore di Higgs è resa ancora più complessa nel caso del MSSM, a causa del gran numero di segnali possibili. In tale teoria sono previsti cinque diversi stati fisici legati alla rottura spontanea di simmetria, di cui due carichi (H^\pm) e tre neutri (h, H, A). In approssimazione ad albero, le masse e gli accoppiamenti di queste particelle possono essere determinati in base a due soli parametri, usualmente individuati in m_A , massa del bosone dispari per trasformazioni di CP , e $\tan\beta$, rapporto tra i valori attesi del vuoto dei doppietti di Higgs. I risultati ottenuti in tale approssimazione, sebbene sostanzialmente modificati dalle correzioni radiative, sono in grado di fornire importanti indizi per le ricerche sperimentali. Nel caso le particelle supersimmetriche si rivelino sufficientemente pesanti da non poter essere prodotte, per ragioni cinematiche, nei decadimenti dei bosoni di Higgs, i canali di decadimento di maggior rilevanza saranno quelli già indicati per il Modello Standard. Nel caso opposto in cui sia cinematicamente consentito il decadimento dei bosoni di Higgs in particelle supersimmetriche leggere, al contrario, i canali di decadimento previsti dal Modello Standard saranno fortemente soppressi. La sensibilità di ATLAS per la scoperta dei bosoni di Higgs del MSSM al variare dei parametri m_A e $\tan\beta$ è illustrata in figura 2.2.

Infine, la scoperta di particelle previste nelle teorie supersimmetriche dovrebbe risultare relativamente semplice nel caso queste abbiano masse inferiori o dell'ordine del TeV, grazie alla sezione d'urto sufficientemente elevata da garantirne una copiosa produzione. L'ambizione di ATLAS non sarà, dunque, solamente quella di evidenziare la presenza di particelle supersimmetriche, ma anche di approfondirne la natura tramite misure di precisione delle loro proprietà, e di determinare a quale, tra i modelli supersimmetrici proposti, aderiscono maggiormente.

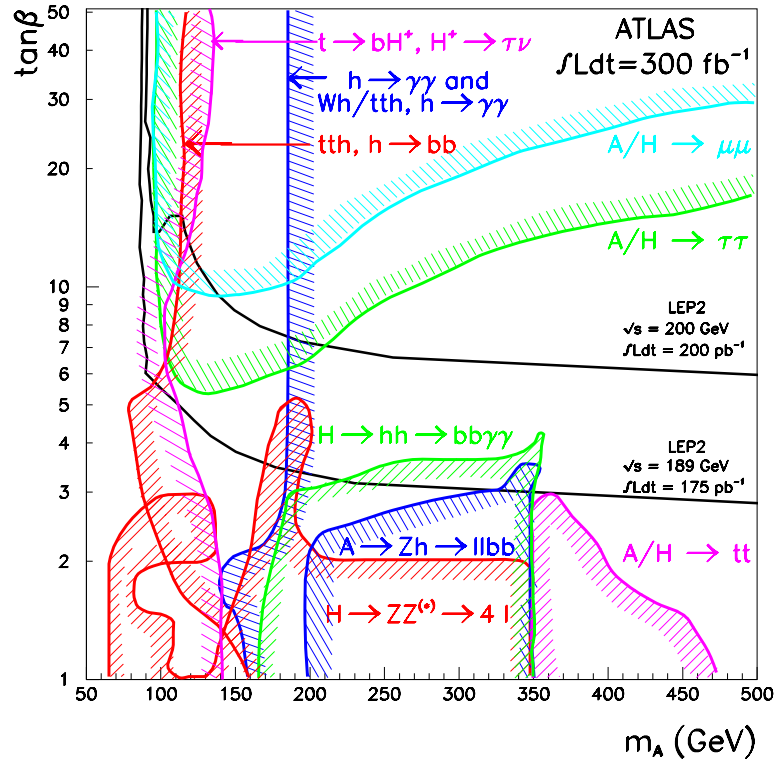


Figura 2.2: Sensibilità di ATLAS alla scoperta dei bosoni di Higgs del MSSM. Sono mostrati nel piano $(m_A, \tan \beta)$ i bordi delle regioni di scoperta a 5σ per ogni singolo canale. Sono inoltre inclusi i limiti attuale ed atteso di LEP2.

Capitolo 3

Il Module Controller Chip

In questo capitolo, dopo una breve descrizione della geometria del rivelatore a pixel di ATLAS, ne viene illustrata la catena di acquisizione dati. In particolare dettaglio è descritto il Module Controller Chip, il circuito integrato di controllo a cui è affidata la comunicazione di ciascun modulo con i driver di uscita del rivelatore. È inoltre spiegato il funzionamento del programma SimPix, utilizzato per simularne il comportamento.

3.1 Geometria del rivelatore a pixel

Il rivelatore a pixel di ATLAS, i cui componenti costitutivi sono moduli rettangolari di $6.28 \times 2.2 \text{ cm}^2$, è suddiviso in tre settori: due parti in avanti (end-cap) ed un corpo centrale (barrel). La struttura del rivelatore a pixel è mostrata in figura 3.1.

Ogni end-cap è composto da tre dischi, disposti perpendicolarmente alla direzione del fascio; questi sono a loro volta formati da due corone di 24 moduli, affacciate in modo da risultare lievemente ruotate l'una rispetto all'altra. Tale rotazione serve a far sì che ciascuna corona possa coprire le zone lasciate inevitabilmente scoperte dall'altra a causa della forma rettangolare dei moduli che la compongono. I valori della coordinata z a cui sono posti i tre dischi degli end-cap, aventi raggio medio di circa 17 cm, sono 49.5, 58.0 e 65.0 cm.

La parte centrale del rivelatore è invece costituita da tre cilindri concentrici di raggio medio pari a 5.05, 8.75 e 12.25 cm, aventi come asse la direzione del fascio. Ognuno dei tre piani (layer) è, a sua volta, composto da 13 anelli di moduli affiancati lungo z . Il numero di moduli che compongono i singoli anelli varia nei tre piani, crescendo con il raggio: 22 moduli per il cilindro più interno (b -layer), 36 per il secondo, 52 per il terzo.

Il b -layer presenta, infine, un paio di particolarità; innanzitutto, essendo la parte del rivelatore più vicina al fascio e quindi quella maggiormente irraggiata, dovrà essere sostituito, all'incirca, ogni tre anni. Inoltre, i moduli di

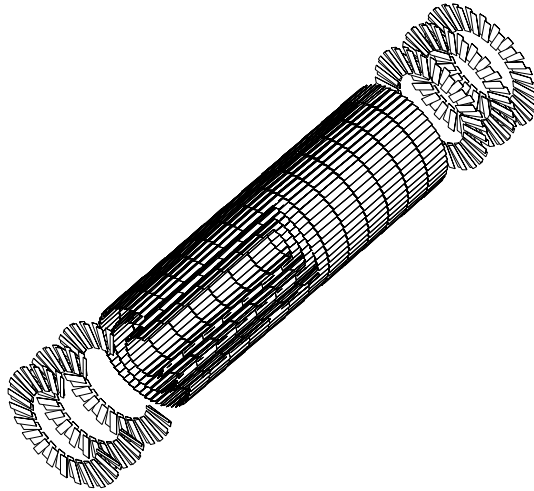


Figura 3.1: Struttura del rivelatore a pixel di ATLAS. In figura sono visibili i dischi degli end-cap ed i tre cilindri che compongono il barrel.

cui è composto sono differenti da quelli utilizzati nelle altre parti del rivelatore.

I moduli degli end-cap e dei due piani più esterni del barrel consistono in una matrice di 328×144 sensori di silicio della dimensione di $50 \times 400 \mu\text{m}^2$, mentre quelli del b -layer sono composti da 328×192 elementi sensibili di $50 \times 300 \mu\text{m}^2$. La scelta di utilizzare pixel di superficie maggiore per i layer esterni del barrel e gli end-cap è motivata dalla volontà di ridurre il numero di canali di uscita del rivelatore e di aumentare lo spazio disponibile per i circuiti di lettura dei singoli sensori di silicio. Questa decisione comporta, però, come ricaduta negativa, una lieve perdita in risoluzione spaziale. Tale perdita non risulta accettabile nel b -layer, per il quale è indispensabile mantenere la maggiore precisione possibile nella localizzazione dei punti spaziali, al fine di non deteriorare la misura di importanti quantità fisiche quale, ad esempio, la posizione dei vertici di interazione e decadimento.

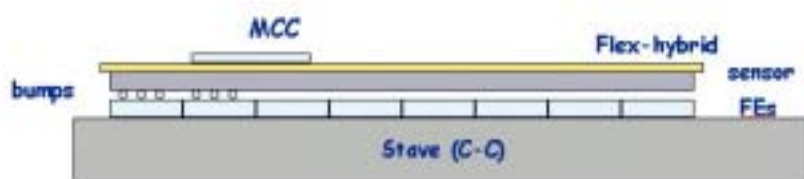


Figura 3.2: Schema di un modulo del rivelatore a pixel di ATLAS. Sono visibili i front-end, il Module Controller Chip, ed il supporto (flex-hybrid) sul quale sono montati.

3.2 La catena di acquisizione

L'interfaccia a basso livello con i sensori del rivelatore a pixel è realizzata grazie a due circuiti integrati, progettati per lavorare ad una frequenza di 40 MHz: i front-end (FE) ed il Module Controller Chip (MCC). Ogni modulo è equipaggiato con 16 circuiti di front-end, ciascuno dedicato alla lettura di una matrice di pixel composta da 18 colonne (24 nel caso dei moduli appartenenti al *b*-layer) e 164 righe, ed un Module Controller Chip, interfacciato con i 16 FE. La disposizione geometrica di tali circuiti all'interno di un modulo del rivelatore è mostrata nell'illustrazione in figura 3.2. In figura 3.3 e 3.4 sono riportati, rispettivamente, la fotografia di un modulo ed il processo di assemblaggio del rivelatore a pixel. I chip di front-end

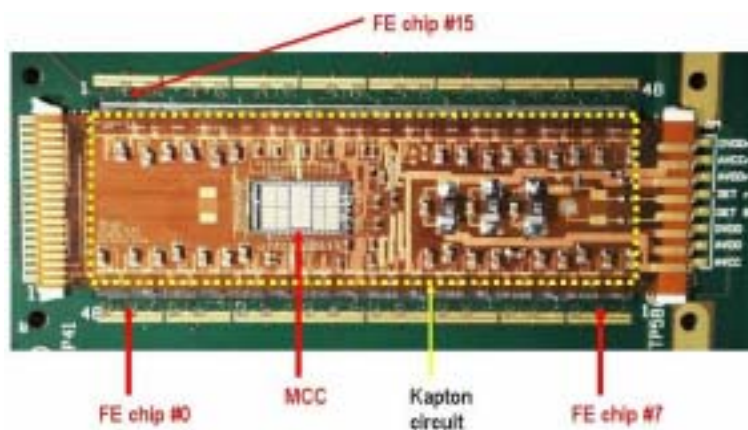


Figura 3.3: Fotografia di un modulo del rivelatore a pixel di ATLAS.

costituiscono il primo anello della catena di acquisizione dati del rivelatore, effettuando fisicamente la lettura dei sensori di silicio ed immagazzinando le informazioni sui pixel colpiti (hit), in attesa delle decisioni del trigger di primo livello. A tale scopo i FE sono equipaggiati con circuiti preposti alla gestione degli hit letti, la cosiddetta logica di fine colonna (EoC), con un trasmettitore seriale e con i circuiti logici necessari ad inizializzare il chip.

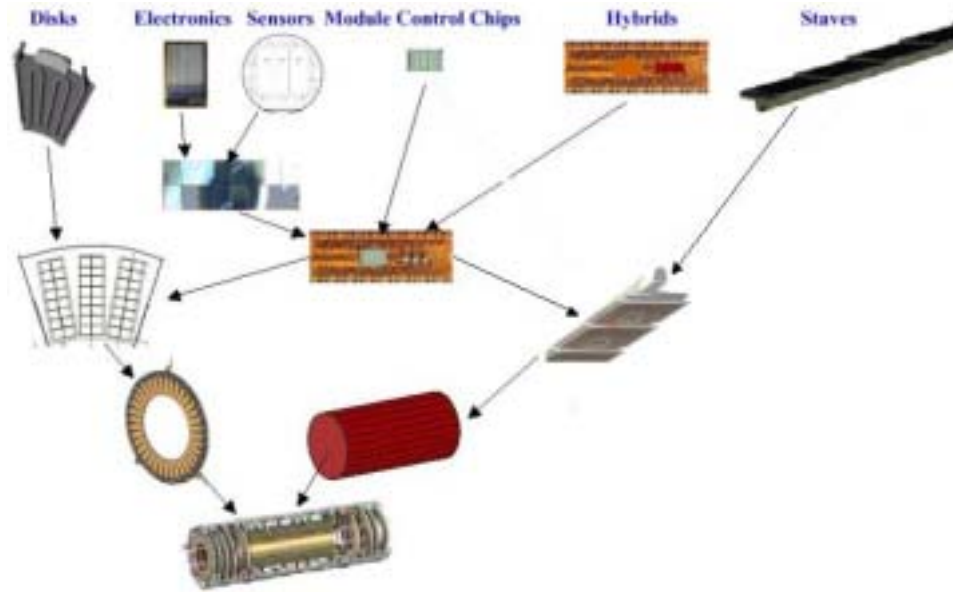


Figura 3.4: Schema di assemblaggio del rivelatore a pixel di ATLAS.

La lettura dei pixel viene effettuata da uno stadio preamplificatore, il quale fornisce, con un tempo di rilassamento di circa 500 ns, un'uscita quasi lineare che dà una misura di modesta risoluzione (4-5 bit) dell'energia rilasciata dalle particelle nel sensore; tale quantità è detta Time Over Threshold (TOT).

Il compito dei circuiti logici di fine colonna è immagazzinare le informazioni lette dai sensori, effettuando la soppressione degli zeri e mantenendo un'associazione tra gli hit letti e l'evento nel quale sono stati prodotti; tale informazione viene preservata attribuendo ad ogni hit, all'atto della lettura, un codice di 7 bit Gray code. Ciascun circuito di EoC riceve il proprio ingresso da una coppia di colonne adiacenti, per minimizzare lo spazio occupato dall'elettronica digitale che controlla lo spostamento dei dati, ed offre la possibilità di immagazzinare un numero di hit variabile, nelle diverse implementazioni previste per i front-end, tra un minimo di 16 ed un massimo di 32. Ogni qual volta arrivi un segnale di trigger ciascun EoC effettua una scansione della propria memoria: tutti gli hit prodotti nell'incrocio dei fasci a cui il trigger si riferisce vengono etichettati, con un codice di 4 bit che li associa al LVL1 corrispondente, come dati da trasmettere al Module Controller Chip tramite la linea seriale di uscita. Tale operazione viene poi effettuata in modo che siano rispettate due condizioni: gli hit devono essere trasferiti non appena sono disponibili ed in ordine per numero di evento; alla fine di ciascun evento viene generata una parola di end-of-event (EoE), trasmessa anche nel caso non vi siano hit, per mantenere il sincronismo tra gli eventi.

L'MCC, oltre a gestire i segnali del trigger di primo livello e la temporizzazione delle operazioni di lettura e trasferimento dati, ha lo scopo di elaborare gli hit in uscita dai front-end, organizzandoli per evento, e di trasferirli ai driver di uscita del rivelatore, detti Read-Out Drivers (ROD).

Nel prossimo paragrafo sono brevemente descritti il protocollo di trasmissione dati tra front-end ed MCC, ed il formato di uscita del Module Controller Chip.

3.2.1 I protocolli di trasmissione dati

Il formato utilizzato per la comunicazione tra i FE e l'MCC prevede che, per ogni hit, vengano trasmessi, nell'ordine: un'intestazione (header), il codice del LVL1 corrispondente, il numero di riga e colonna del pixel colpito e l'eventuale informazione sul Time Over Threshold. La dimensione di ciascuno di questi campi è riportata nella tabella seguente, insieme alla lunghezza complessiva degli hit nel caso sia presente o meno l'informazione sul TOT.

PAROLA	DIMENSIONE (bit)
Header	1
Numero di Level1	4
Riga	8
Colonna	5
Time Over Threshold	8
Hit senza TOT	18
Hit con TOT	26

Le parole di EoE sono costruite secondo lo stesso schema e la loro dimensione risulta quindi pari a quella di un normale hit. Gli EoE vengono riconosciuti grazie alla sequenza contenuta nei campi dedicati al numero di riga e colonna, che li rende distinguibili da qualsiasi hit valido; all'interno di tali parole può inoltre essere codificata l'indicazione di eventuali errori riscontrati nel funzionamento del FE che le ha prodotte.

Il formato di uscita dei front-end è illustrato in figura 3.5.

Il protocollo di trasmissione dati dall'MCC verso i ROD prevede che ogni evento venga costruito inviando, nell'ordine: un header; i numeri di LVL1 e di incrocio dei fasci (Bunch Crossing) corrispondenti; un'eventuale parola di errore generata dall'MCC (MCC flag); l'identificatore di ciascun front-end, seguito dagli hit ricevuti da esso e da un'eventuale parola di errore (FE flag); un terminatore (trailer) di lunghezza differente nel caso sia trasmessa o meno l'informazione sul TOT. La dimensione in bit di ognuno di questi blocchi è riportata nella tabella seguente.

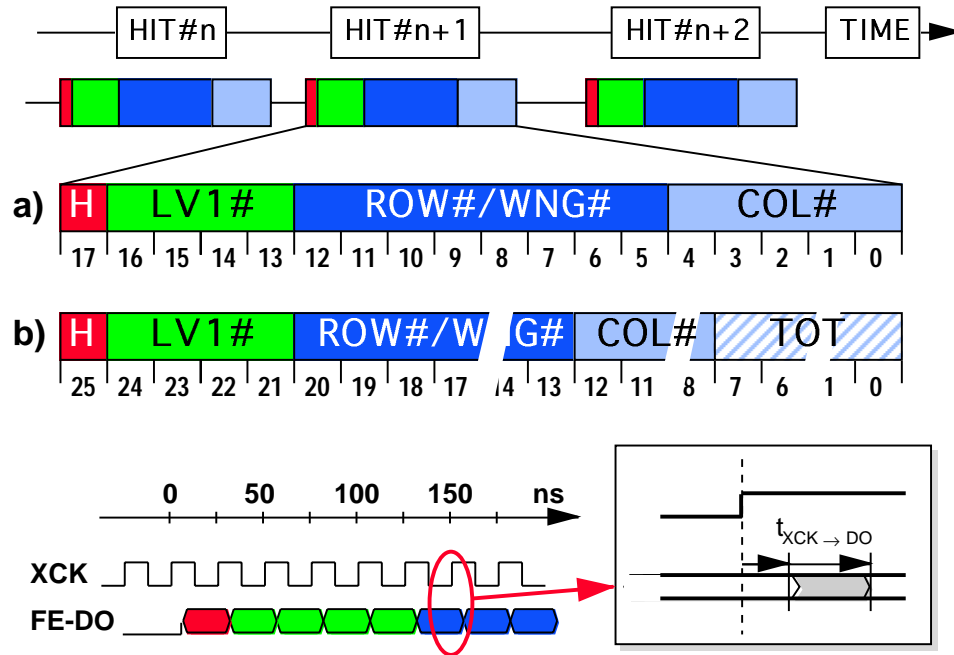


Figura 3.5: Formato di output dei front-end.

PAROLA	DIMENSIONE (bit)
Header	5
Numero di Level1	8
Bunch Crossing ID	8
MCC flag	8
Numero di FE	8
Hit senza TOT	13
Hit con TOT	21
FE flag	13
Trailer (senza TOT)	14
Trailer (con TOT)	22

Il formato di uscita dell'MCC è illustrato in figura 3.6.

Degno di nota è che in tale formato non è prevista la scrittura delle parole di EoE e gli hit hanno una dimensione di 5 bit inferiore a quella codificata dai front-end. Tale riduzione è dovuta al fatto che, durante la ricostruzione, l'Event Builder elimina l'header e l'identificatore dell'evento presenti in ciascun hit; tali informazioni risulterebbero superflue nel nuovo formato poiché il numero di LVL1 è già scritto all'inizio di ogni evento ricostruito, e l'header degli hit viene sostituito da quello dei singoli FE. Il passaggio tra i due formati consente, in tal modo, di ottenere una significativa riduzione del volume dei dati. Il fattore di compressione K può essere facilmente stimato

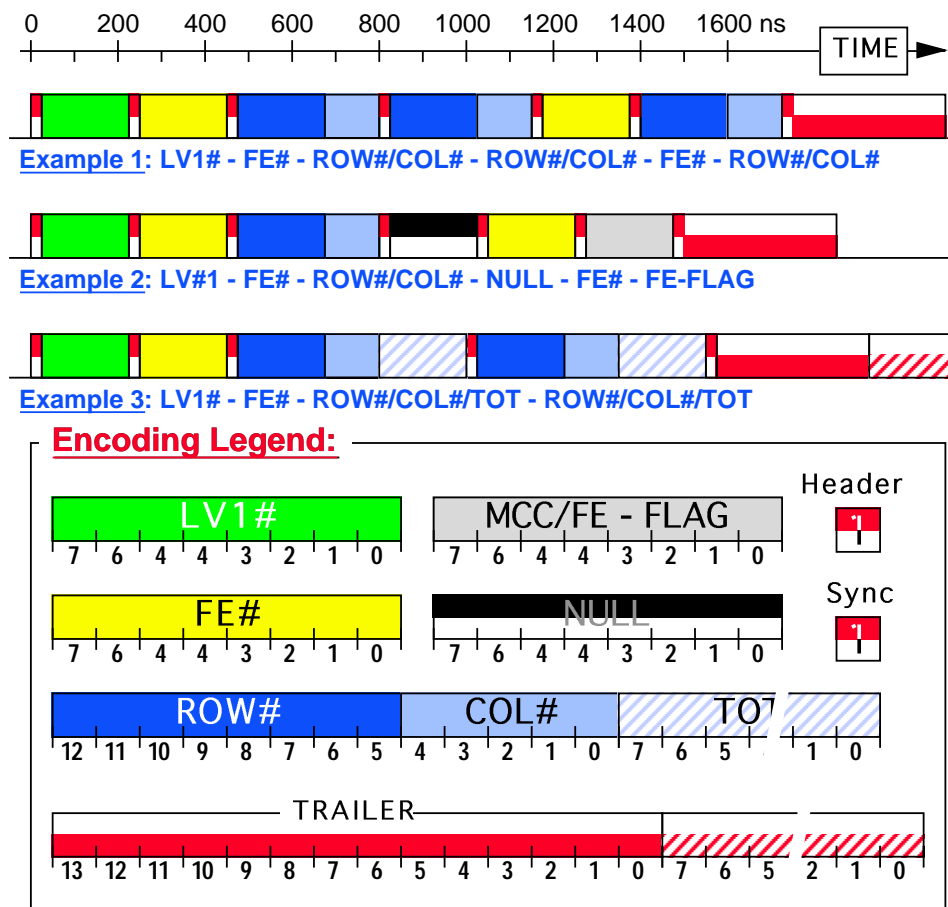


Figura 3.6: Formato di output del Module Controller Chip.

in base alla relazione

$$K = 1 - \frac{N_{bit}(MCC)}{N_{bit}(FE)}$$

dove $N_{bit}(MCC)$ e $N_{bit}(FE)$ indicano, rispettivamente, la dimensione in bit di un evento ricostruito dall'MCC e la somma dei bit trasmessi dai 16 FE all'MCC per lo stesso evento. Tale fattore, valutato su un campione di 1000 eventi prodotti simulando condizioni di alta luminosità, risulta pari al 42%, come mostrato in figura 3.7.

3.3 Il Module Controller Chip

In questo paragrafo è descritto in dettaglio il funzionamento del circuito integrato che svolge sia la ricostruzione degli eventi a partire dai dati raccolti dai front-end, sia la propagazione dei segnali di controllo e del clock ai 16

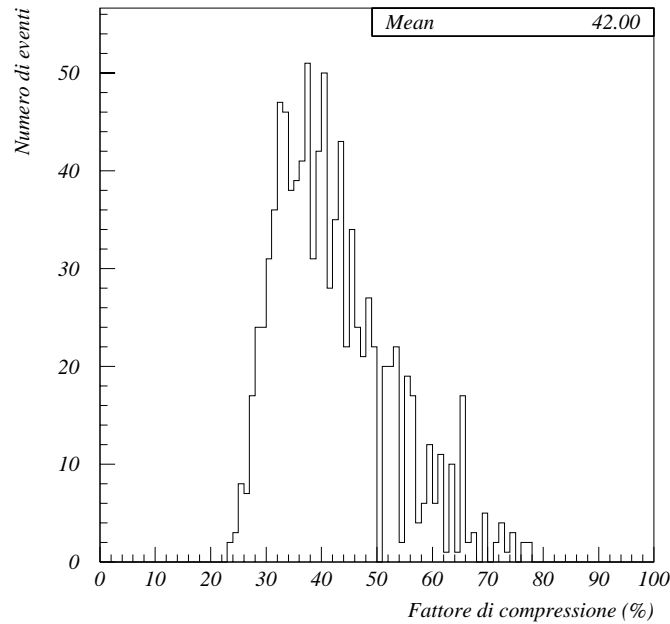


Figura 3.7: Fattore di compressione.

FE di ogni modulo. Tale circuito è progettato per operare in modo sincrono rispetto al proprio segnale clock a 40 MHz, frequenza pari a quella con cui vengono fatti incrociare i due fasci di protoni accelerati da LHC.

Come è mostrato in figura 3.8, i blocchi fondamentali dell'MCC sono il Trigger Timing and Control (TTC), i 16 Receiver, l'Event Builder ed il Command Decoder. Le operazioni svolte da ciascuno di questi blocchi sono descritte nei seguenti paragrafi.

3.3.1 Il Trigger Timing and Control

Questo blocco ha il compito di generare i segnali di temporizzazione per tutto il modulo a cui appartiene e di gestire la distribuzione del trigger di primo livello.

Il TTC è dotato di un contatore, detto Pending Event Counter, che viene incrementato ad ogni comando di trigger inviato ai front-end e decrementato per ogni evento completamente ricostruito e trasmesso in uscita dall'MCC. Ogni qual volta il Module Controller Chip riceva un segnale dal trigger di primo livello, il TTC controlla il proprio contatore: se il contenuto del Pending Event Counter risulta inferiore a 16, cioè al massimo numero di eventi che possono essere elaborati contemporaneamente, il segnale di trigger vie-

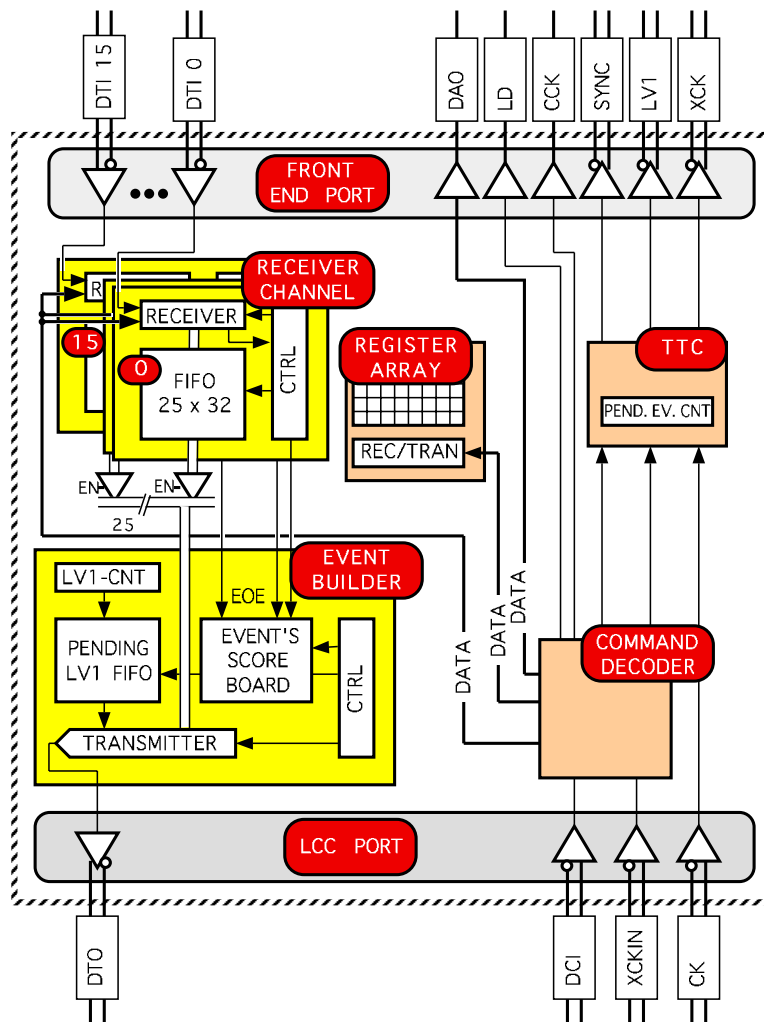


Figura 3.8: Schema a blocchi del Module Controller Chip.

ne propagato ai front-end. In tal caso i valori dei contatori di evento e di incrocio dei fasci vengono copiati in una delle 16 locazioni di una memoria FIFO (FirstIn-FirstOut), contenuta nell'Event Builder e detta Pending Level1 FIFO. Tale informazione verrà utilizzata dall'Event Builder, all'inizio della ricostruzione dell'evento, per associare correttamente gli hit letti dai front-end al segnale di LVL1 corrispondente.

Invece, nel caso i front-end e l'MCC stiano già elaborando il numero massimo di eventi, ulteriori trigger vengono ignorati ed il TTC non li propaga al resto dell'elettronica. Conseguentemente, l'MCC non provvede alla ricostruzione degli eventi ignorati, per i quali vengono irrimediabilmente persi tutti gli hit presenti sul modulo in questione. In questa condizione viene incrementato, ad ogni LVL1 perso, un contatore del numero di eventi ignorati, contenuto

nella locazione della Pending Level1 FIFO in cui sono scritte le informazioni sull'ultimo trigger correttamente accettato; tale contatore resta invece impostato a 0 nel caso non venga ignorato alcun LVL1.

Infine, il TTC ha la possibilità di propagare ad MCC e FE più LVL1 consecutivi, in numero pari a quanto indicato in uno dei registri di configurazione del chip, per ogni segnale di trigger ricevuto. Tale funzione è stata implementata in quanto risulta particolarmente utile durante i test effettuati sui prototipi del chip. Durante i test di irraggiamento, ad esempio, i segnali di sincronismo che indicano il passaggio del fascio hanno spesso una precisione molto inferiore ai 25 ns, periodo di campionamento dell'elettronica, rendendo necessario ricostruire più eventi consecutivi ad ogni passaggio del fascio, per avere la certezza di acquisire correttamente gli hit prodotti in tale occasione.

3.3.2 I Receiver

L'MCC contiene 16 Receiver, ciascuno associato ed interconnesso, tramite una linea seriale, ad uno dei front-end del modulo.

Ogni Receiver è equipaggiato con una FIFO, utilizzata per immagazzinare gli hit e gli EoE ricevuti, fino a quando l'Event Builder non li rilegga per ricostruire l'evento a cui appartengono. Tale operazione risulta necessaria in quanto il protocollo di trasmissione prevede che i dati siano trasferiti dai FE ai Receiver non appena sono disponibili (data push), mentre l'MCC può cominciare a ricostruire un evento soltanto dopo che tutti i FE ne abbiano completamente scaricato gli hit. Quest'ultimo meccanismo è implementato aggiornando e controllando, per ogni Receiver, un contatore contenuto nell'Event Builder. Tale contatore viene incrementato, per un particolare Receiver, ad ogni parola di EoE ricevuta; tutti i 16 contatori, collettivamente chiamati score board, vengono invece decrementati per ogni evento completamente ricostruito e trasmesso in uscita dall'MCC. Per evitare di ricostruire un evento prima che tutti gli hit siano stati trasmessi ai Receiver, viene effettuato un controllo dello stato della score board, cominciando la ricostruzione soltanto se risulta piena, cioè se nessuno dei 16 contatori è nullo. Tale algoritmo è illustrato graficamente in figura 3.9

Infine, la funzione svolta dalle FIFO è indispensabile nel caso in cui i front-end ricevano un segnale di trigger ed inizino a trasmettere nuovi dati all'MCC, mentre quest'ultimo è ancora impegnato nella ricostruzione di un evento precedente.

Attualmente, la dimensione delle FIFO contenute nei Receiver non ha un valore definito, ma è un parametro d'implementazione del chip, variabile, in funzione della tecnologia elettronica utilizzata, tra un minimo di 32 parole ed un massimo stimato attorno alle 128 parole. Da tale parametro dipende criticamente l'efficienza del processo di acquisizione dati e, quindi, dell'intero rivelatore a pixel. Può infatti succedere che un front-end trasmetta dati

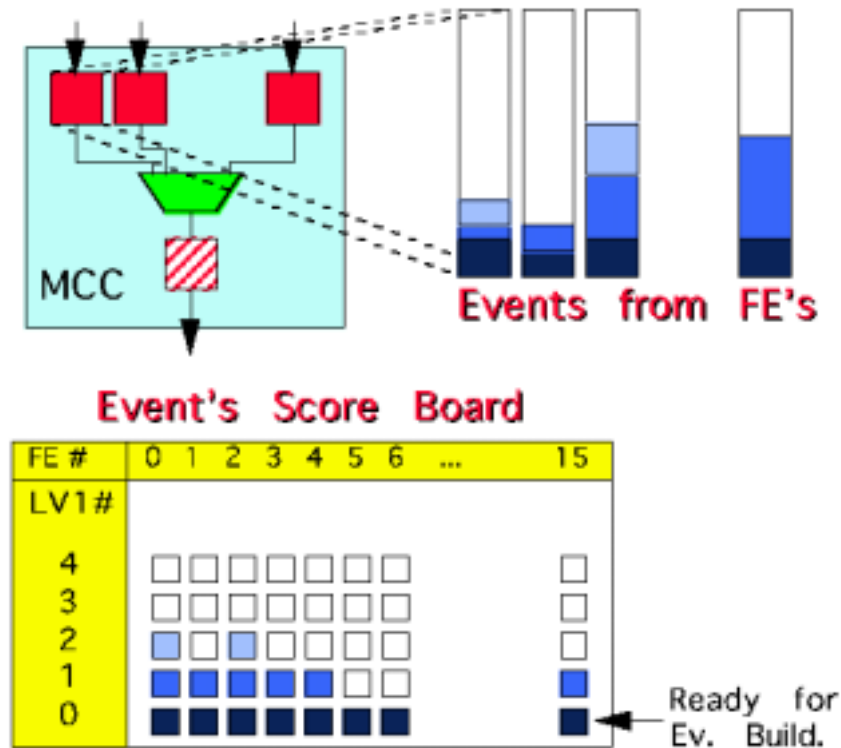


Figura 3.9: Algoritmo di gestione della score board. Un evento risulta pronto per la ricostruzione solo se ogni Receiver ha ricevuto la parola di EoE, e, quindi, se la score board è piena.

al proprio Receiver quando la FIFO di quest'ultimo è piena. In tal caso, poiché all'MCC non è consentito sospendere le operazioni dei FE, si verifica un'inevitabile perdita di informazioni.

In tale situazione si presentano due alternative, definite overflow e bloccaggio della FIFO. Quando non è possibile la scrittura di tutti gli hit perché non vi sono sufficienti locazioni libere, il Receiver prova a scrivere nella FIFO almeno la parola di EoE, nella posizione immediatamente successiva a quella in cui è stato scritto l'EoE dell'evento precedente. A questo punto vi sono due alternative: se la nuova parola può essere scritta correttamente si dice che si è verificata una condizione di overflow; se non vi è nemmeno una locazione libera e l'EoE non può essere scritto, si ha il cosiddetto bloccaggio della FIFO. In entrambi i casi vengono perse le informazioni di quel FE per l'evento che ha causato il riempimento della FIFO, ma sono differenti le ripercussioni sugli eventi successivi.

Nel caso di overflow, la presenza dell'EoE garantisce il sincronismo tra i Receiver e, quindi, gli eventi successivi possono essere immagazzinati correttamente, a patto che non provochino a loro volta il riempimento della FIFO.

Nel caso di bloccaggio, invece, la perdita della parola di end-of-event comprometterebbe l'allineamento fra gli eventi scritti successivamente nei diversi Receiver, confondendone gli hit. Per scongiurare tale pericolo, le FIFO che risultano bloccate possono continuare ad essere lette al fine di ricostruire gli eventi precedenti, ma nessun nuovo hit vi può essere aggiunto, anche nel caso vi siano locazioni libere. Perché una FIFO possa essere sbloccata devono essere verificate le seguenti condizioni: che le FIFO di tutti i Receiver siano vuote; che non sia in corso la ricostruzione di alcun evento. Infine, affinché gli eventi continuino a poter essere ricostruiti in presenza di una o più FIFO bloccate, anche per queste ultime continua ad essere aggiornata la score board.

3.3.3 L'Event Builder

Compito dell'Event Builder è gestire la ricostruzione degli eventi, leggendone gli hit dalle FIFO dei Receiver e segnalando eventuali condizioni di errore.

Nel caso la score board sia piena ed il chip non sia impegnato nella ricostruzione di alcun evento, l'Event Builder procede ad estrarre dalla Pending Level1 FIFO le informazioni sul numero di LVL1 e di incrocio dei fasci a cui corrisponde l'evento da ricostruire e sui trigger ignorati successivamente ad esso. A questo punto, dopo aver trasmesso in uscita l'header del nuovo evento, l'Event Builder legge una ad una le FIFO dei 16 Receiver, saltando quelle eventualmente vuote e bloccate, trasmettendone in uscita gli hit fino ad incontrare una parola di EoE. Ogni gruppo di hit letti da un Receiver è preceduto dall'identificatore del FE corrispondente e seguito da un'eventuale parola (flag) di errore. Alla fine della ricostruzione viene trasmesso un terminatore, detto trailer, e sono decrementati i contatori della score board ed il Pending Event Counter. Infine, nel caso il numero di segnali di trigger ignorati sia diverso da zero, l'Event Builder attende il tempo necessario alla trasmissione di tre terminatori prima di iniziare la ricostruzione dell'evento successivo. Tale attesa risulta necessaria al sistema dei ROD per costruire un numero di eventi vuoti pari a quelli ignorati, in modo da mantenere la corrispondenza tra segnali di trigger ed eventi in uscita dal rivelatore.

Le flag previste attualmente sono quattro: WNG0, WNG1, ERR0, ERR1. Le prime due condizioni riguardano lo stato della FIFO della quale si stanno trasmettendo gli hit e vengono generate, rispettivamente, nel caso in cui abbia subito un overflow per l'evento corrente, e nel caso sia bloccata. Le altre due flag, invece, sono legate al controllo effettuato dai Receiver sul numero di LVL1 trasportato dagli hit e dagli EoE. La flag di ERR0 viene scritta nel caso hit di uno stesso Receiver abbiano numeri di LVL1 diversi; la flag di ERR1 viene generata qualora risultino diversi i numeri di LVL1 codificati nelle parole di EoE contenute nei 16 Receiver, condizione che indica la perdita di sincronia nella lettura dai front-end. Nel caso sia verificata alme-

no una delle quattro condizioni appena elencate, l'Event Builder provvede a generare e a trasmettere in uscita una parola di 8 bit nella quale viene codificato lo stato di ciascuna flag.

Infine, un'altra importante caratteristica di progetto del Module Controller Chip è legata alla velocità di trasmissione dei dati in uscita. È, infatti, previsto che l'MCC possa trasferire dati ai ROD in quattro diverse modalità: utilizzando una singola linea seriale alla frequenza di clock (40 MHz), ottenendo una velocità di trasferimento di 40 Mbit/s; utilizzando due linee seriali alla frequenza di clock, oppure una singola linea a frequenza doppia, potendo così trasferire 80 Mbit/s; utilizzando due linee seriali a 80 MHz, trasmettendo i dati a 160 Mbit/s.

3.3.4 Il Command Decoder

Il Command Decoder è il blocco dedicato a ricevere e a decodificare i comandi inviati, tramite comunicazione seriale, dai ROD all'MCC al fine di gestirne le operazioni; risulta inoltre indispensabile per il controllo e la configurazione dei FE, in quanto l'MCC è l'unico oggetto accessibile dall'esterno del rivelatore. I comandi che il Module Controller Chip è in grado di interpretare si dividono in tre gruppi: Trigger, Fast e Slow.

Il comando di Trigger consiste in una parola di 5 bit e serve a trasmettere all'MCC le decisioni del trigger di primo livello. Tali comandi vengono gestiti dal TTC che provvede a gestirne il conteggio e a propagarli ai chip di front-end.

I comandi di tipo Fast, codificati in 9 bit, sono composti di due parti: un'instestazione di 5 bit ed un corpo di 4 bit. I comandi appartenenti a tale gruppo, dedicati alla gestione dei contatori degli eventi e degli incroci di fascio, alla calibrazione del chip ed alla sincronizzazione con i FE, possono essere gestiti, in assenza di segnali di Trigger, senza bloccare il processo di acquisizione dati.

Infine, i comandi di tipo Slow, per i quali è previsto un identificatore di 9 bit, un corpo di 8 bit ed un eventuale campo di lunghezza variabile riservato ai dati, sono dedicati alla configurazione del chip. A questo gruppo appartengono, infatti, i comandi di lettura e scrittura nei registri di configurazione, nei front-end e nelle FIFO dei Receiver, i segnali di reset dei FE e dell'MCC ed il comando che dà il via all'acquisizione. Caratteristica dei comandi di tipo Slow è quella di causare l'interruzione della lettura degli eventi da parte dell'MCC, al contrario dei comandi Fast che possono essere eseguiti anche quando il chip è in fase di acquisizione. Così facendo, la modalità di configurazione del chip e quella di presa dati risultano completamente disaccoppiate.

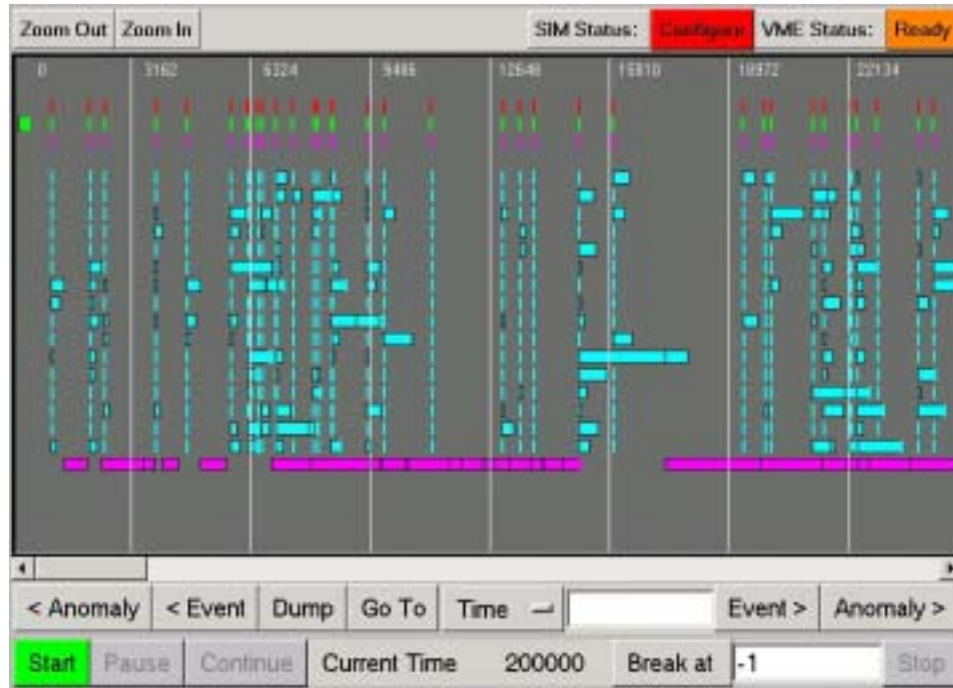


Figura 3.10: Schermata del programma SimPix. Sono visibili i tracciati temporali delle uscite dei FE e dell'MCC, nonché i segnali di controllo ricevuti dai ROD e trasmessi ai front-end.

3.4 SimPix

SimPix è un programma sviluppato in C++ allo scopo di simulare il comportamento dell'elettronica di lettura del rivelatore a pixel, per poterne analizzare le inefficienze.

L'organizzazione temporale del programma prevede che il comportamento di ogni parte della catena di acquisizione, dai front-end fino ai singoli blocchi dell'MCC, venga simulato per ciascun colpo di clock analizzato. In tal modo può essere correttamente simulata la concatenazione temporale degli eventi, mantenendo una stretta correlazione tra il comportamento dell'elettronica ad un determinato istante e quanto è accaduto in precedenza. Questo schema consente di valutare esattamente le ripercussioni di singole inefficienze, eventualmente limitate ad un unico blocco della catena, sull'intero processo di acquisizione. Tale risultato non può essere ottenuto, al contrario, tramite l'utilizzo di simulazioni parametriche che si limitino a generare le varie inefficienze con una frequenza determinata dalla probabilità ad esse associata, perdendo completamente la correlazioni tra gli eventi.

Una schermata del programma SimPix è riportata in figura 3.10.

Il principale vantaggio conseguente dall'adozione del C++ per lo svilup-

po del progetto è l'elevata modularità; questo è un requisito essenziale per una simulazione che necessita di costante aggiornamento, a causa della continua evoluzione delle specifiche dei chip.

SimPix è progettato per poter essere utilizzato in maniera flessibile. È possibile variare le condizioni di carico dei front-end, fornendo loro, eventualmente sovrapponendoli, hit generati casualmente secondo una distribuzione statistica oppure prodotti con il programma di simulazione dei processi fisici nel rivelatore ATLAS, basato sul pacchetto di simulazione GEANT3, e controllando la frequenza con cui vengono prodotti i segnali del trigger di primo livello. La stessa flessibilità si ha nella scelta del modello dell'elettronica. Sia per i front-end, sia per l'MCC, sono previsti un modello ideale, che non prevede inefficienze, e più modelli reali, dei quali possono essere variate le caratteristiche fondamentali. Ad esempio, nel caso del Module Controller Chip, sono parametri della simulazione la dimensione delle FIFO dei LVL1 e dei Receiver, e la velocità di trasferimento in uscita.

Inoltre, SimPix è equipaggiato con un modulo di analisi che permette di studiare le inefficienze del processo di acquisizione, riportando informazioni quali il numero di trigger ignorati, il numero di hit persi e l'occupazione nel tempo delle FIFO e delle linee seriali di ingresso e di uscita.

Infine, è prevista la possibilità di effettuare un confronto tra il modello software dell'MCC ed un chip reale (tramite un'apposita scheda chiamata MCC-Exerciser) o una descrizione a basso livello dell'elettronica (modello Verilog).

All'interno del progetto complessivo di SimPix, per avere a disposizione gli strumenti necessari a svolgere gli studi presentati in questo lavoro, mi sono occupato dello sviluppo di una serie di moduli di simulazione; in particolare, ho implementato la possibilità di effettuare uno studio del comportamento dell'intero rivelatore a pixel, in modo da poterne desumere informazioni sull'efficienza complessiva. Inoltre, mi sono occupato dello sviluppo di un modello per il Module Controller Chip, che riproduca gli algoritmi descritti in questo capitolo, al fine di stimarne l'efficienza e la robustezza.

3.4.1 La generazione degli hit

La valutazione dell'efficienza del sistema elettronico di acquisizione dati dipende criticamente dalle condizioni fisiche a cui sono sottoposti i moduli del rivelatore a pixel. Lo stesso chip può, infatti, risultare perfettamente efficiente oppure del tutto inadeguato allo scopo per cui è stato progettato, al variare di parametri fisici quali il numero medio di tracce che attraversano i moduli ad ogni evento e la frequenza di uscita del trigger di primo livello. Le condizioni che si avranno ad LHC non sono, però, completamente prevedibili, in quanto tali energie e frequenze di interazione non sono finora mai state raggiunte; inoltre, come in tutti gli esperimenti di fisica delle alte energie, tali condizioni possono fluttuare nel tempo, al variare del funziona-

mento della macchina acceleratrice.

Risulta, quindi, molto importante poter verificare il comportamento dell'elettronica di acquisizione al variare degli stimoli esterni. A questo scopo SimPix prevede un sistema flessibile di generazione degli hit. Tale sistema offre la possibilità di generare eventi in tre modi sostanzialmente diversi: casualmente, manualmente o leggendoli da file.

Produrre hit casualmente, secondo una distribuzione di probabilità della quale si possano variare i parametri, risulta utile per studi nei quali sia importante simulare correttamente il carico dell'elettronica, senza interessarsi del contenuto fisico dei dati. La generazione manuale serve, invece, a riprodurre condizioni particolari, impossibili da ottenere casualmente; ad esempio, consente di decidere il numero di pixel colpiti in ogni front-end.

Infine, gli hit possono essere letti da file prodotti tramite simulazioni Monte Carlo degli eventi fisici e della risposta del rivelatore. Questo generatore è l'unico che consente di valutare quanto le informazioni di interesse fisico vengono degradate dalle inefficienze dell'elettronica di lettura dei moduli. Vista la sua importanza, è prevista la possibilità di leggere file di vario formato, da quelli contenenti informazioni su un singolo modulo a quelli in cui sono immagazzinati gli hit per l'intero rivelatore.

Ciascuno dei generatori fin qui descritti può essere utilizzato da solo o in combinazione con altri. L'uso di più generatori consente, ad esempio, di sovrapporre eventi di fondo a segnali provenienti da canali fisici interessanti, o di simulare il rumore presente nell'elettronica. È inoltre possibile scegliere quali front-end siano interessati da ogni singolo generatore; in tal modo si riescono a provocare asimmetrie nella distribuzione del carico tra i FE del modulo in esame.

Infine, un ruolo cruciale è ricoperto dalla generazione dei segnali del trigger di primo livello. Tali segnali vengono prodotti seguendo una distribuzione esponenziale di cui si può controllare il valor medio; su di essi è inoltre possibile imporre le limitazioni previste nelle specifiche di ATLAS, le quali impongono che due segnali di trigger successivi debbano distare almeno quattro incroci di fascio (equivalenti ad un intervallo temporale di 100 ns), e che in ciascuna finestra temporale di 80 μ s possano essere presenti più di 8 LEVEL1.

3.4.2 La simulazione dell'elettronica

Il comportamento di ciascuno dei due componenti della catena di acquisizione del rivelatore a pixel, front-end e Module Controller Chip, è simulato tramite moduli separati di SimPix. Questo approccio consente di selezionare, in maniera indipendente, uno fra i vari modelli disponibili per ciascuno dei due blocchi. In entrambi i casi sono implementati un modello ideale, il quale non prevede inefficienze, e più modelli reali, corrispondenti a differenti

versioni del chip.

In tal modo risulta possibile disaccoppiare lo studio del comportamento di ciascuna delle due parti. Ad esempio, una simulazione effettuata utilizzando il modello ideale per i FE ed uno reale per l'MCC, consente di individuare esclusivamente le inefficienze dovute a quest'ultimo.

Un altro vantaggio dato dalla modularità della simulazione è la possibilità di aggiornare frequentemente, e con uno sforzo relativamente limitato, i modelli utilizzati per ciascun componente. Ciò risulta particolarmente importante nella fase attuale di sviluppo del rivelatore, durante la quale le caratteristiche di implementazione dell'elettronica subiscono frequenti modifiche.

La comunicazione fra i diversi moduli della simulazione è gestita attraverso un'architettura orientata temporalmente: ciascun modulo della simulazione (generatori, modello dei front-end e di ciascun blocco dell'MCC, modulo di analisi) viene interpellato a ciascun colpo di clock simulato. Il risultato delle operazioni di ogni modulo (evento) viene scritto in un archivio (database) comune ed accessibile a tutti gli elementi della simulazione. Sulla scrittura nel database degli eventi vige una regola di ordinamento temporale: non vi può mai essere scritto alcun evento riguardante tempi precedenti a quello attualmente simulato, in modo che le azioni di ogni modulo influenzino gli eventi futuri, ma non quelli passati.

Infine, la simulazione dell'elettronica può essere effettuata in due differenti modalità: singolo modulo e intero rivelatore. Nella prima viene analizzato esclusivamente il comportamento di un singolo modulo, selezionato all'inizio della simulazione. Nel secondo caso, invece, dopo la lettura di un file contenente un numero fissato di eventi, SimPix procede a simulare la risposta di ciascun modulo contenente almeno un hit.

3.4.3 Il modulo di analisi e ricostruzione

SimPix è dotato di un modulo di analisi, sviluppato allo scopo di fornire informazioni sull'efficienza dell'elettronica simulata e sulle cause delle eventuali perdite di dati.

Il modulo di analisi provvede a salvare, durante l'esecuzione della simulazione, il valore dell'occupanza di tutto le memorie contenute nei chip (memorie dei FE, FIFO dei Receiver, Pending Level1 FIFO) e delle linee seriali usate per la comunicazione tra FE ed MCC e verso i RoD. Effettuare tale operazione ad ogni colpo di clock simulato comporterebbe, nel caso di simulazioni riguardanti migliaia di eventi, una quantità di dati considerevole e di scarso interesse; infatti è sufficiente una risoluzione ben più modesta per individuare l'andamento temporale delle quantità analizzate. Ciascun valore di occupanza viene, quindi, campionato ad una frequenza selezionabile, decisa prima dell'inizio della simulazione, effettuandone la media sull'intervallo tra due campionamenti successivi e su una finestra temporale di ampiezza differente.

Inoltre, alla fine della simulazione viene salvato il numero di dati persi e di segnali del trigger di primo livello ignorati. Per ciascuno degli hit persi è indicata la causa dell'inefficienza; ad esempio, nel caso dell'MCC, la causa può essere la condizione di overflow o bloccaggio della FIFO del Receiver che avrebbe dovuto immagazzinare l'hit. Viene determinato, per ciascun Receiver, il numero di volte in cui la FIFO in esso contenuta si è bloccata ed il tempo in cui è rimasta in tale condizione. Infine, per tutte le FIFO, compresa la Pending Level1, viene tenuto conto del numero di colpi di clock in cui essa è risultata essere piena.

Nel caso venga effettuata una simulazione del comportamento dell'intero rivelatore, oltre all'analisi fin qui descritta, SimPix procede anche ad una ricostruzione degli eventi simulati. Tale procedimento consiste nel confrontare, alla fine dell'esecuzione, i dati utilizzati come ingresso con quelli prodotti in uscita dall'MCC simulato, ricostruendo un file, simile a quello da cui i dati sono stati letti, che tenga conto degli hit persi e di quelli aggiunti da eventuali sorgenti di rumore. In tal modo i due file, quello originale e quello ricostruito, possono essere elaborati da routine di analisi fisica, come ad esempio la simulazione del trigger di secondo livello; confrontando poi i risultati ottenuti nei due casi, può essere valutato l'impatto delle inefficienze riscontrate sullo studio dei canali fisici interessanti ad LHC.

Capitolo 4

Efficienza di un singolo modulo

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle simulazioni volte a valutare l'efficienza dell'MCC nella lettura di un singolo modulo del rivelatore a pixel. Le condizioni esterne simulate sono quelle più estreme, cioè quelle a cui saranno sottoposti, in condizioni di alta luminosità, i moduli del b-layer.

4.1 La simulazione

4.1.1 Scopo della simulazione

Scopo delle simulazioni presentate in questo capitolo è valutare la capacità del Module Controller Chip di far fronte agli stimoli esterni presenti ad LHC in condizioni di alta luminosità, ricostruendo correttamente gli eventi selezionati dal trigger di primo livello.

La prima fase di tale studio verrà svolta in funzione dei parametri costruttivi del chip, al fine di dimensionarli adeguatamente in vista delle future implementazioni. Quantità quali la dimensione delle FIFO interne e la velocità di trasferimento dati lungo la linea seriale di uscita, a parità di algoritmo scelto per la ricostruzione, influenzano significativamente l'efficienza di tutto il processo.

È evidente come quest'ultima sia destinata ad aumentare con la velocità di trasferimento dati e con la dimensione delle memorie del chip, la quale risulta, però, limitata da considerazioni geometriche e di implementazione. La disposizione dei circuiti elettronici sui moduli del rivelatore fissa le dimensioni dell'MCC e, di conseguenza, la superficie disponibile per le memorie in esso contenute. Inoltre, le proibitive condizioni di irraggiamento a cui il rivelatore sarà sottoposto ad LHC costringono ad implementarne l'elettronica di lettura con tecnologie resistenti alle radiazioni. Queste ultime, indispensabili per garantire un'adeguata resistenza nel tempo e per scon-

giurare il pericolo che le misure vengano inquinate da un eccessivo rumore dovuto alle radiazioni, comportano, per contro, un livello di miniaturizzazione limitato rispetto a quello ottenibile con tecnologie tradizionali. Come conseguenza, la dimensione massima per le FIFO dell'MCC risulta limitata a valori dell'ordine delle centinaia di parole, pur dipendendo fortemente dalla tecnologia di implementazione scelta. Una stima di quale sia la minima configurazione in grado di garantire una completa efficienza del chip può, quindi, dare importanti indicazioni sulla tecnologia da utilizzare.

Per valutare la perdita di informazioni dovuta alle inefficienze dell'elettronica al variare dei parametri fondamentali, si terrà conto degli hit persi dai Receiver e dei segnali del trigger di primo livello ignorati, avendo cura di simulare con precisione le condizioni esterne previste per LHC, ma tralasciando momentaneamente il contenuto fisico dei dati utilizzati. Utili informazioni riguardo alle cause delle eventuali inefficienze riscontrate possono, infine, essere desunte analizzando le occupanze delle memorie e delle linee seriali tramite cui i dati arrivano ai Receiver ed escono dall'MCC.

Dopo aver dimensionato i parametri di progetto dell'elettronica, in modo tale da garantirne la piena efficienza nelle condizioni nominali indicate dalle specifiche di ATLAS, verrà effettuato un secondo studio, volto a valutare la robustezza della soluzione trovata. Infatti, come in tutti gli esperimenti di fisica delle alte energie, fluttuazioni nel comportamento della macchina acceleratrice o del sistema di selezione degli eventi possono far variare nel tempo, anche significativamente, il carico di lavoro di ciascun rivelatore. Risulta quindi importante valutare l'impatto sull'efficienza del rivelatore a pixel di eventualità quali, ad esempio, un aumento del fondo, oppure della frequenza di selezione del trigger di primo livello.

Questa seconda fase dello studio verrà, quindi, condotta agendo su due parametri: aumentando il numero di eventi di fondo prodotti ad ogni incrocio dei fasci rispetto a quello previsto in condizioni nominali di alta luminosità; incrementando la frequenza con cui vengono generati i segnali del trigger di primo livello, fino a superare quella considerata massima nelle specifiche dell'esperimento. La prima operazione, in particolare, consente di valutare, in modo generale, la robustezza della configurazione scelta rispetto all'aumento del numero medio di hit presenti in ogni evento e, quindi, del carico di front-end ed MCC. In quest'ottica, agire sul numero medio di eventi di fondo risulta del tutto equivalente a simulare una variazione nella quantità di rumore presente nel rivelatore od un abbassamento delle soglie applicate sulla carica rilasciata dalle particelle incidenti.

Come indicatori delle inefficienze riscontrate verranno utilizzate le stesse quantità già sfruttate nella prima parte dello studio, cioè il numero di hit persi e di trigger ignorati. Grazie ad essi sarà tracciato l'andamento dell'efficienza di ricostruzione dell'MCC al variare degli stimoli esterni, ponendo particolare interesse nell'individuare le condizioni critiche e la rapidità con cui si degrada la risposta del rivelatore non appena queste ultime vengano supe-

rate.

Un'ultima fase di analisi, svolta utilizzando gli stessi strumenti, si occuperà di valutare la robustezza, rispetto ad eventuali variazioni nella geometria del rivelatore a pixel di ATLAS, della soluzione indicata come più efficiente.

4.1.2 Le condizioni simulate

Condizioni nominali

Il carico di lavoro dell'elettronica di lettura del rivelatore a pixel dipende, innanzitutto, dalle condizioni fisiche presenti ad LHC.

In modo del tutto generale, la frequenza media di interazione $\bar{\nu}$ tra le particelle di due fasci in collisione può essere calcolata tramite la relazione

$$\bar{\nu} = L\sigma(E)$$

dove L è la luminosità della macchina acceleratrice e $\sigma(E)$ è la sezione d'urto tra le particelle che compongono i due fasci, espressa in funzione della loro energia. Nelle condizioni nominali previste ad LHC, $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; inoltre, la sezione d'urto totale protone-protone ad un'energia $E = 14 \text{ TeV}$, vale circa 10^6 nb .

In tali condizioni verranno prodotte, quindi, poco meno di 10^9 interazioni protone-protone al secondo, o, equivalentemente, 24 a ciascun incrocio dei fasci. Solamente una piccola percentuale di tali interazioni darà luogo ad eventi fisici interessanti, mentre le altre costituiranno il fondo per le misure effettuate.

Per quel che riguarda il trigger di primo livello, le specifiche dell'esperimento ATLAS prevedono che gli eventi da ricostruire debbano essere selezionati con una frequenza media di 75 kHz. La frequenza massima prevista, a causa delle limitazioni imposte dall'elettronica di front-end dei rivelatori, è invece pari a 100 kHz. Per far sì che questo limite venga rispettato, i cosiddetti Read-Out Drivers (ROD), i quali si occupano di propagare i segnali di controllo ai dispositivi di lettura dei rivelatori e di raccoglierne i dati in uscita, applicano due limitazioni alla distribuzione dei segnali di trigger. La prima, di semplice implementazione, prevede che tra due LEVEL1 contigui debbano intercorrere almeno 4 incroci di fascio, pari a 100 ns; la seconda, la cui attuazione prevede l'utilizzo di un algoritmo più complicato, impedisce che in ciascuna finestra temporale di 80 μs possano essere presenti più di 8 segnali del trigger di primo livello.

Descrizione del rivelatore e dei front-end

In tutte le simulazioni svolte, il cui scopo è quello di caratterizzare la risposta del Module Controller Chip, sono state fatte alcune assunzioni sul funzionamento dei sensori di silicio, dei discriminatori ad essi collegati e dei

chip di front-end.

Per i singoli pixel di silicio è stata assunta un'efficienza, costante al variare dell'energia delle particelle incidenti, pari al 97%; ciò vuol dire che il 3% degli hit viene perso ancor prima di arrivare ai front-end. Inoltre, agli hit prodotti da particelle, ne sono stati sovrapposti altri, per simulare la presenza di rumore, prodotto statisticamente all'interno dei sensori di silicio. Tale rumore è stato generato in quantità tale da dar luogo ad un numero medio di hit per pixel per incrocio dei fasci (occupanza) pari a 10^{-5} , valore circa 10 volte inferiore a quello dovuto agli hit di segnale.

Assumendo come unità la carica dell'elettrone, la soglia applicata sulla carica depositata nei sensori è posta a 3000 per il b -layer e a 3700 per il resto del rivelatore, con un errore di 200. Il moduli del b -layer si differenziano, rispetto a tutti gli altri, poiché il loro ridotto spessore comporta un valor medio inferiore per la distribuzione di carica del rumore, consentendo di applicare una soglia più bassa.

Infine, tutti gli studi verranno svolti assumendo un comportamento ideale per i front-end. Questa scelta è motivata dalla volontà di evidenziare esclusivamente le inefficienze dovute al Module Controller Chip. Inoltre, utilizzare un modello reale per i FE comporterebbe una probabilità non nulla di perdere dati prima che essi arrivino all'MCC, rischiando di sottovalutarne il carico. Al contrario, le caratteristiche di implementazione del Module Controller Chip devono essere dimensionate nelle condizioni di carico più proibitive, cioè nell'eventualità in cui nessun hit venga perso prima di giungere all'MCC; l'approccio più corretto risulta, quindi, quello di utilizzare un modello ideale per i front-end.

Studio sui parametri di implementazione dell'MCC

Ai fini dello studio sui parametri di implementazione del Module Controller Chip, verrà utilizzato un campione di 1000 eventi contenenti b -jet prodotti nel decadimento di un bosone di Higgs di massa pari a 100 GeV; per riprodurre con fedeltà le condizioni nominali, a ciascun evento sono preventivamente sovrapposti, in media, 24 processi di fondo.

In figura 4.1 è riportata l'occupanza media dei pixel di ciascuno dei tre cilindri del barrel, valutata sugli eventi appartenenti al campione scelto. Per quanto riguarda gli end-cap, questi ultimi si trovano in condizioni di irraggiamento assimilabili a quella del secondo layer del barrel.

Come si può notare, il b -layer, essendo la parte del rivelatore più vicina al fascio e quindi ai vertici di interazione, risulta quella maggiormente popolata da hit; inoltre, in tale regione, è evidente un addensamento delle tracce sugli anelli centrali.

Nella prima fase dello studio, svolta in condizioni nominali, così come in quelle incentrate su variazioni degli stimoli esterni, occorre dimensionare i parametri dell'MCC in base al carico di lavoro dei moduli maggiormente

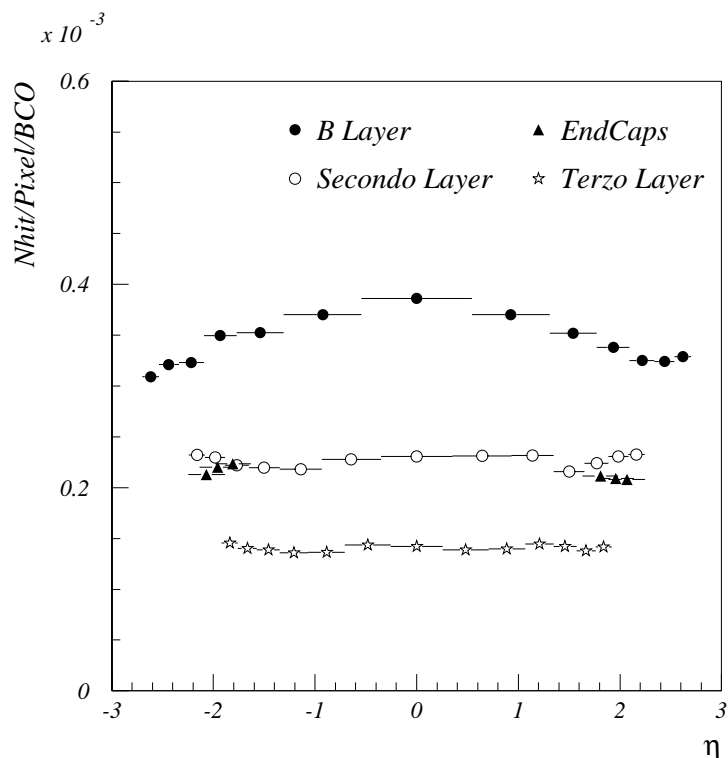


Figura 4.1: Occupazione media dei singoli pixel del rivelatore. È riportata la media per i pixel dei tre cilindri che costituiscono il barrel e dei due end-cap.

colpiti, al fine di ottenere per essi la piena efficienza; solo in tal modo si ha, infatti, la certezza che i risultati ottenuti possano essere estesi all'intero rivelatore. Alla luce della distribuzione riportata in figura 4.1, tutte le simulazioni descritte in questo capitolo verranno, dunque, svolte su un singolo modulo scelto tra quelli appartenenti all'anello centrale del *b*-layer.

Per quanto riguarda, invece, il trigger di primo livello, la frequenza media di generazione dei segnali verrà impostata a 100 kHz e sulla distribuzione temporale dei segnali di LEVEL1 saranno imposte le condizioni previste dalle specifiche di ATLAS, già descritte in precedenza.

Studio sulla robustezza della soluzione trovata

Come già detto, per valutare la robustezza della soluzione trovata nel corso dello studio sui parametri costruttivi del Module Controller Chip, se ne analizzerà l'efficienza al variare del numero di eventi di fondo (pile-up) prodotti ad ogni collisione e della frequenza di selezione del trigger di primo livello.

In particolare, il numero di eventi di pile-up verrà aumentato fino a raggiungere e superare le condizioni critiche per il funzionamento dell'MCC. È infatti molto importante poter valutare, oltre al livello di irraggiamento per il quale l'MCC comincia a manifestare inefficienze, la rapidità con cui la sua risposta si deteriora, una volta superate le condizioni critiche, e le principali cause delle perdite di dati riscontrate.

La frequenza di selezione del trigger di primo livello verrà fatta crescere da 100 kHz, valore considerato massimo nelle specifiche di ATLAS, fino a 200 kHz, per raggiungere i quali dovranno essere disabilitate le condizioni normalmente imposte sulla propagazione dei segnali di LEVEL1. Il valore massimo è stato fissato a 200 kHz poiché l'intero esperimento non è progettato per funzionare a frequenze superiori, per le quali si avrebbe una probabilità non trascurabile di malfunzionamenti diffusi in tutti i rivelatori; in tale contesto risulterebbe, dunque, scarso l'impatto di eventuali inefficienze nella lettura del rivelatore a pixel.

Variazioni nella geometria del rivelatore

Eventuali variazioni nella geometria del rivelatore a pixel possono avere notevoli ricadute sulla quantità di dati prodotta sui singoli moduli ad ogni incrocio dei fasci. Ad esempio, diminuendo il raggio di uno dei tre cilindri del barrel, aumenta significativamente l'occupanza dei singoli pixel in esso contenuti. Infatti, portando il cilindro più vicino al fascio, il numero di tracce che lo attraversano aumenta, seppur di poco, mentre il numero di moduli di cui è composto diminuisce proporzionalmente alla sua superficie; le tracce si distribuiscono così su un numero minore di pixel che risultano, quindi, mediamente più occupati.

Poiché in passato, per ragioni costruttive, la geometria del rivelatore a pixel è stata più volte modificata, risulta evidente l'importanza di valutare l'impatto di tali variazioni sull'efficienza del Module Controller Chip. A tale scopo è stata presa in esame una versione della geometria precedente a quella attuale, nella quale il *b*-layer aveva un raggio di 4 cm ed era composto da 13 anelli di 18 moduli ciascuno; la geometria attuale, descritta nel paragrafo 3.1, prevede, invece, un raggio di 5.05 cm ed anelli contenenti 22 moduli.

Per tale geometria, la distribuzione del numero medio di hit per pixel sul rivelatore assume, in condizioni nominali, un aspetto simile a quello mostrato in figura 4.1; questa volta, però, i pixel del modulo maggiormente colpito risultano avere un'occupanza media maggiore, per un fattore pari ad 1.3, di quella riscontrata con la geometria attuale.

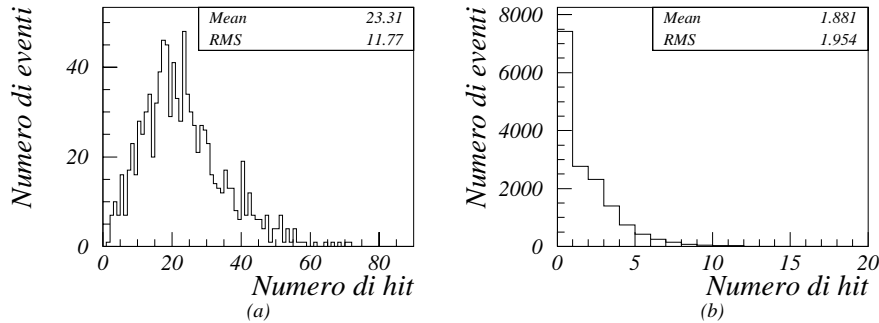


Figura 4.2: Distribuzione degli hit sul modulo analizzato. (a): distribuzione del numero di hit sull'intero modulo; (b): distribuzione del numero di hit sui singoli FE.

4.2 Risultati

4.2.1 Parametri di implementazione

Lo studio sull'efficienza del Module Controller Chip al variare dei parametri d'implementazione è stato svolto, come già detto, su un campione di 1000 eventi di alta luminosità, contenenti b -jet con 24 eventi di pile-up sovrapposti. In particolare, si è studiato uno dei moduli maggiormente interessati da hit: tramite SimPix è stato simulato il comportamento del Module Controller Chip in esso contenuto, al variare della velocità di trasferimento sulla linea di uscita e della dimensione delle FIFO dei Receiver. Il modulo studiato, nei 1000 eventi appartenenti al campione scelto, è stato mediamente colpito da 23.3 hit, suddivisi in modo da averne, in media, 1.9 su ciascuno dei 16 front-end. Le distribuzioni del numero di hit per l'intero modulo e per i singoli front-end sono riportate in figura 4.2.

L'analisi del comportamento dell'MCC è stata ripetuta per le tre diverse velocità di trasferimento previste, variando, in ciascuno dei casi, la dimensione delle FIFO dei Receiver tra un minimo di 32 ed un massimo di 128 parole. I risultati ottenuti per velocità di 40, 80 e 160 Mbit/s, commentati nei sottoparagrafi successivi, sono riportati rispettivamente in figura 4.3, 4.4 e 4.5.

Uscita a 40 Mbit/s

In questo primo caso l'efficienza del processo di ricostruzione effettuato dal Module Controller Chip risulta costantemente inferiore all'85%.

Dai grafici riportati in figura 4.3 è evidente come i Receiver, per piccoli valori della dimensione delle memorie in essi contenute, non siano in grado

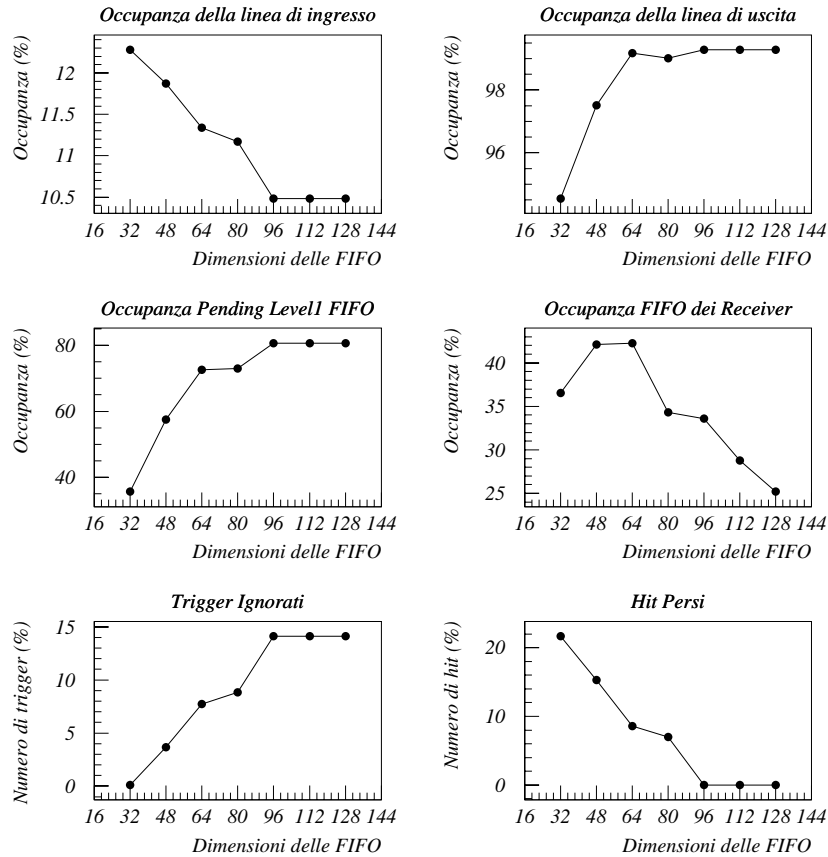


Figura 4.3: Risultati ottenuti per la configurazione con velocità a di trasferimento in uscita pari a 40 Mbit/s.

di immagazzinare tutti gli hit trasmessi dai front-end a cui sono collegati. Inoltre, si può notare che il numero di hit persi diminuisce all'aumentare della dimensione delle FIFO, fino ad annullarsi per valori superiori alle 96 parole. Questo non significa, tuttavia, che oltre tale valore si ottenga una piena efficienza. Infatti, parallelamente alla diminuzione degli hit persi, si ha un aumento dell'occupazione della Pending Level1 FIFO e del numero di trigger ignorati.

La causa di entrambe queste inefficienze risiede nella limitata banda passante della linea di uscita; ciò è reso evidente dal grafico che ne riporta l'occupazione. Si può infatti notare come tale quantità risulti costantemente molto elevata e raggiunga il 100% nel caso in cui le FIFO dei Receiver abbiano dimensione superiore alle 64 parole. La saturazione della linea di uscita indica che nuovi hit vengono trasmessi dai FE ai Receiver con una frequenza

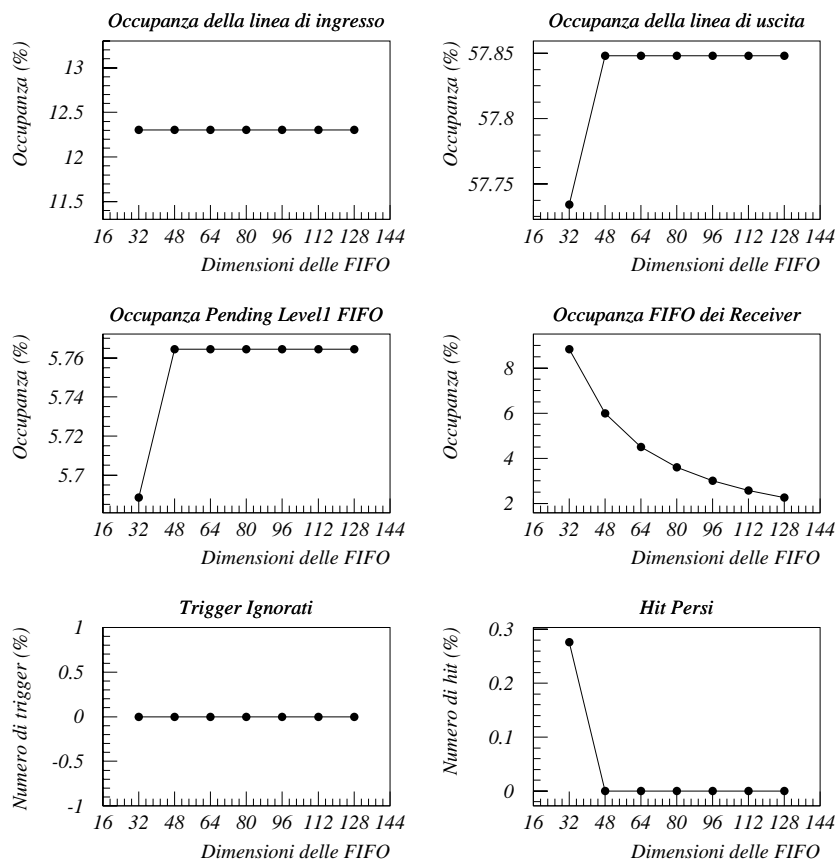


Figura 4.4: Risultati ottenuti per la configurazione con velocità di trasferimento in uscita pari a 80 Mbit/s.

maggiore di quella con cui possono essere scaricati in uscita i dati precedentemente immagazzinati. Ciò comporta un progressivo accumulo, all'interno dei Receiver, di hit in attesa di essere ricostruiti dall'Event Builder; tale accumulo, nel caso di FIFO dalla profondità troppo limitata, ne provoca l'overflow ed il bloccaggio, con conseguente perdita di dati. Se, invece, le FIFO risultano sufficientemente capienti da contenere gli hit di almeno 16 eventi consecutivi, il problema si sposta sulla Pending Level1 FIFO. Quest'ultima, dal momento che la frequenza con cui giungono all'MCC nuovi segnali di trigger supera quella di ricostruzione degli eventi, tende, a sua volta, a saturare, costringendo il TTC ad ignorare i segnali di trigger che non possono essere correttamente propagati.

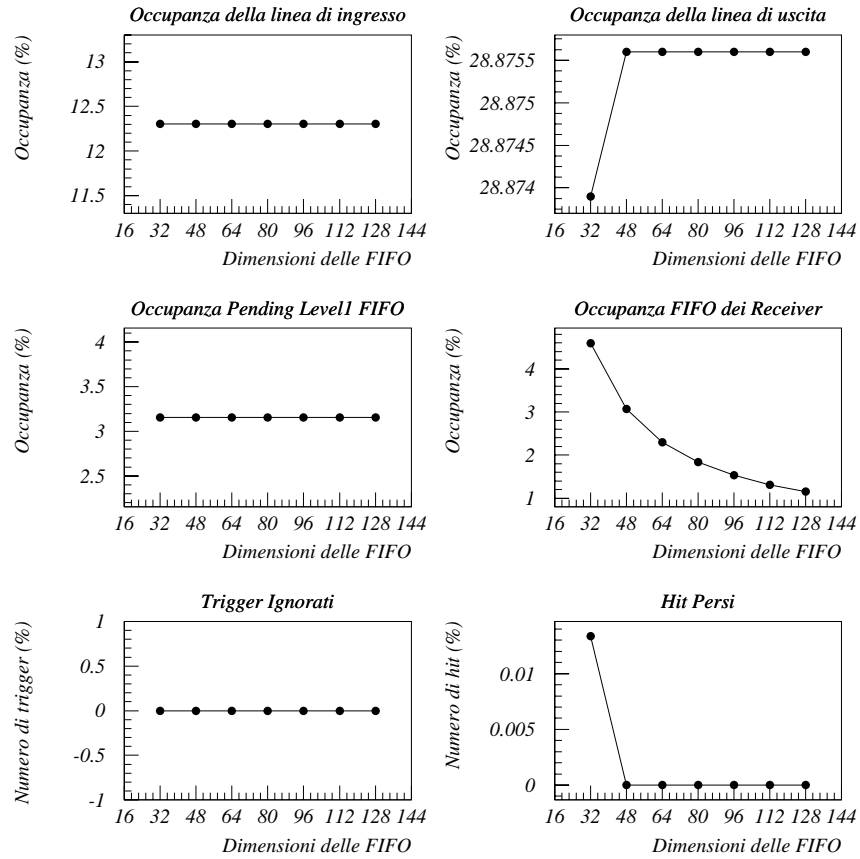


Figura 4.5: Risultati ottenuti per la configurazione con velocità di trasferimento in uscita pari a 160 Mbit/s.

Uscita a 80 Mbit/s

In questo caso l'efficienza del Module Controller Chip risulta decisamente soddisfacente. Non viene, infatti, ignorato alcun segnale di trigger e si ha una perdita di dati, peraltro inferiore allo 0.3%, esclusivamente nell'ipotesi di utilizzare FIFO di 32 parole. Inoltre il valore dell'occupazione di Pending Level1 FIFO e Receiver risulta costantemente inferiore al 6% e al 9% rispettivamente, mentre vale circa 60% per la linea di uscita.

Infine, si può notare come l'occupazione delle FIFO dei Receiver diminuisca notevolmente al crescere della loro dimensione.

Uscita a 160 Mbit/s

Nell'ultimo caso analizzato i risultati sono molto simili a quelli ottenuti per velocità di trasferimento pari a 80 Mbit/s, sebbene risulti ancor maggiore l'efficienza del processo di ricostruzione. Anche utilizzando FIFO di dimensione pari a 32 parole, viene perso meno dello 0.02% degli hit; tale perdita di informazione è dovuta, inoltre, all'overflow di una singola FIFO, contrariamente all'analogo caso precedentemente discusso, in cui si riscontrava il bloccaggio di tre Receiver e l'overflow di un quarto.

Infine, tutte le occupanze riportate in figura 4.5, risultano circa pari alla metà di quelle misurate nel caso di uscita a 80 Mbit/s.

Conclusioni

I risultati ottenuti indicano che la configurazione più efficiente è, come prevedibile, quella caratterizzata da una velocità di trasferimento pari a 160 Mbit/s e da FIFO di 128 parole. Tale soluzione appare, dunque, la migliore candidata per la reale implementazione del chip; tramite l'utilizzo di tecnologie resistenti alle radiazioni sufficientemente miniaturizzate sarà, infatti, possibile realizzare FIFO delle dimensioni richieste. Inoltre, la possibilità di utilizzare due linee seriali in uscita ad una frequenza di 80 MHz, sebbene non ancora sperimentata, è attualmente in fase di sviluppo e verrà implementata nella prossima generazione di Module Controller Chip.

A questo livello di analisi appare, però, pienamente accettabile anche la soluzione con FIFO di uguale profondità, ma velocità di trasferimento dimezzata. È facilmente prevedibile, comunque, che questa seconda configurazione risulti meno robusta della prima, a causa del maggior livello di occupanza delle linee seriali e delle memorie interne.

Concludendo, nonostante fra le due ipotesi la prima risulti evidentemente preferibile, anche sulla seconda merita di essere svolta un'ulteriore analisi, per valutarne la robustezza rispetto alle variazioni degli stimoli esterni.

4.2.2 Robustezza della configurazione scelta

Per valutare la robustezza delle configurazioni indicate nelle conclusioni dell'analisi precedente, ne è stata studiata l'efficienza di ricostruzione all'aumentare della frequenza di selezione del trigger di primo livello e del numero di eventi di pile-up prodotti ad ogni collisione.

In particolare, per lo studio relativo alla densità dei segnali di LEVEL1, è stato utilizzato il campione di 1000 eventi già sfruttato per l'analisi sui parametri di implementazione, variando la frequenza di trigger tra 100 e 200 kHz. Una seconda parte dello studio è invece stata svolta aumentando progressivamente, da un minimo di 30 ad un massimo di 120, il numero di processi di fondo sovrapposti a ciascuno dei 1000 eventi utilizzati, contenenti b -jet. In entrambi i casi l'analisi è stata effettuata, ancora una volta, su un

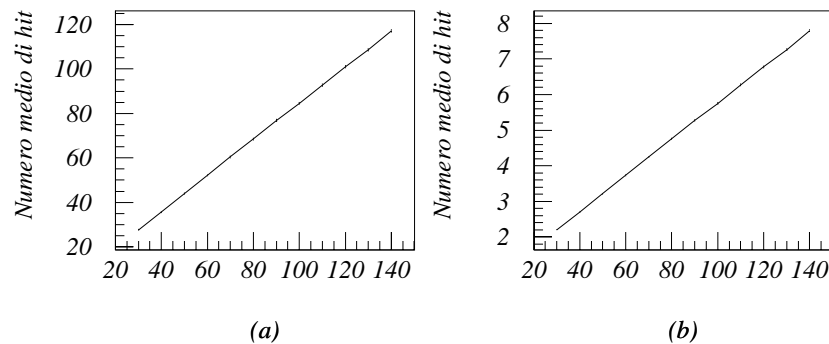


Figura 4.6: Valor medio della distribuzione degli hit sul modulo analizzato in funzione del numero di eventi di fondo. (a): distribuzione del numero di hit sull'intero modulo; (b): distribuzione del numero di hit sui singoli FE.

singolo modulo appartenente all'anello centrale del b -layer.

Per quanto riguarda la seconda parte, il valor medio della distribuzione degli hit sul modulo analizzato e sui suoi singoli front-end è riportato, in funzione del numero di eventi di fondo prodotti, in figura 4.6.

I risultati ottenuti per le due configurazioni analizzate sono riportati e commentati nei seguenti paragrafi.

Configurazione con uscita a 160 Mbit/s

I risultati dello studio sulla frequenza di trigger e sulla quantità di fondo sono riportati, rispettivamente, in figura 4.7 e 4.8.

Come si può notare da tali grafici, la configurazione del Module Controller Chip che prevede memorie da 128 parole e velocità di trasferimento in uscita pari a 160 Mbit/s, risulta particolarmente robusta, mantenendo una piena efficienza anche nel caso di variazioni significative del carico di lavoro.

Per quanto concerne la densità dei segnali di trigger, non si riscontra, infatti, alcuna perdita di dati per frequenze di selezione comprese tra 100 e 200 kHz. Inoltre, passando dall'estremo inferiore a quello superiore dell'intervallo di frequenze analizzato, le memorie interne e le linee seriali usate per la trasmissione dei dati, pur raddoppiando la propria occupanza, si mantengono comunque lontane dalla saturazione. In realtà, l'occupanza delle memorie interne risulta un po' più che raddoppiata: ciò è dovuto al fatto che la velocità media con cui vengono ricostruiti gli eventi diminuisce all'aumentare dell'occupanza della linea di uscita, causando un maggiore accumulo di dati nelle FIFO.

Nell'analisi in funzione della quantità di fondo, le prime inefficienze vengo-

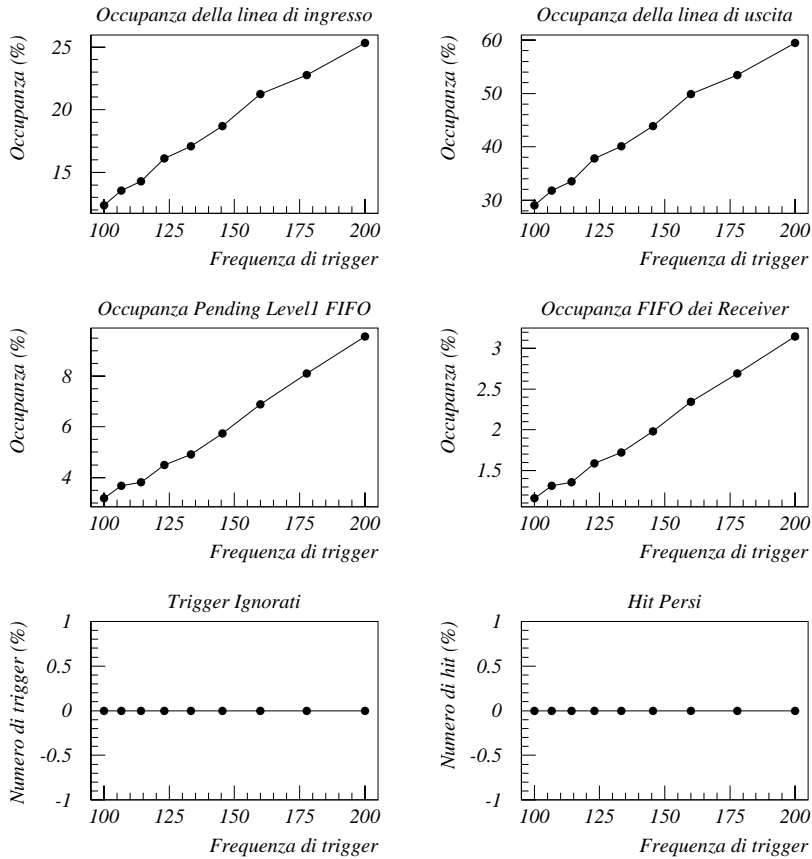


Figura 4.7: Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 160 Mbit/s.

no riscontrate nel caso ad ogni collisione protone-protone vengano prodotti, in media, 100 eventi di pile-up. Poiché quest'ultima è una condizione decisamente improbabile da raggiungere in pratica, in quanto corrisponde ad un'occupanza media circa tre volte superiore a quella che si ha in condizioni nominali, si può dire che la configurazione analizzata risulta pienamente soddisfacente anche per quel che riguarda la robustezza rispetto ad eventuali aumenti del carico sul rivelatore.

Configurazione con uscita a 80 Mbit/s

I risultati ottenuti dagli studi sulla frequenza di trigger e sulla quantità di fondo sono riportati, rispettivamente, in figura 4.9 e 4.10.

Da tali risultati risulta evidente che la configurazione del Module Controller Chip in cui le FIFO dei Receiver hanno una profondità di 128 parole ed i

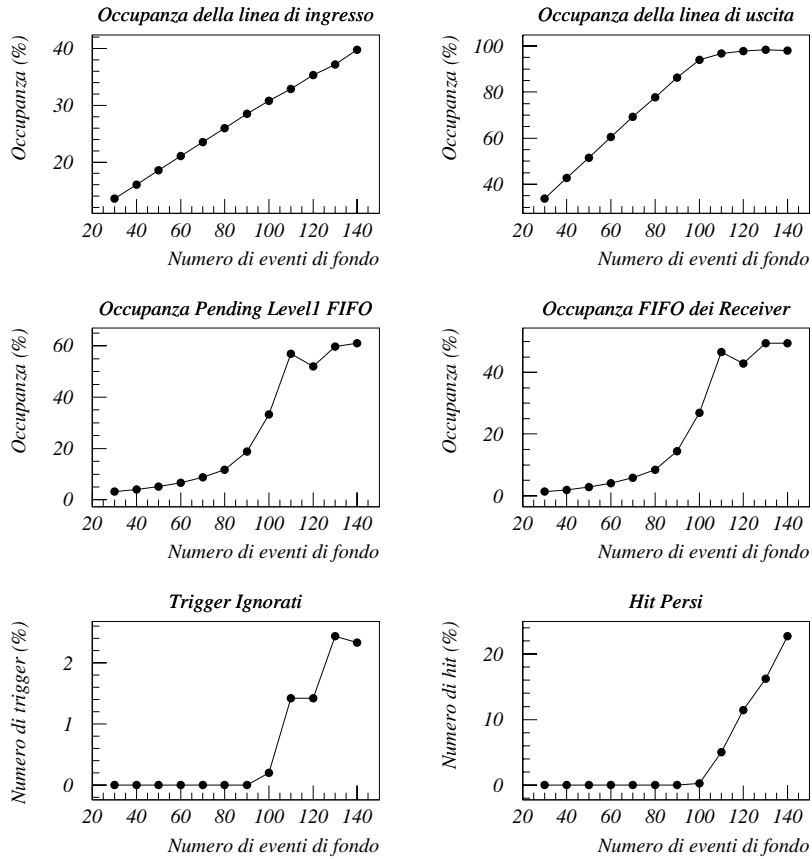


Figura 4.8: Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 160 Mbit/s.

dati vengono trasmessi in uscita a 80 Mbit/s, pur essendo pienamente efficiente in condizioni nominali, risulta molto meno robusta della soluzione analizzata nel paragrafo precedente.

Infatti, per frequenze superiori a 150 kHz si ha una perdita di segnali di trigger, la quale aumenta pressoché linearmente con la frequenza, fino a raggiungere circa il 20% a 200 kHz. Al contrario non si ha mai overflow o bloccaggio delle FIFO dei Receiver, poiché la dimensione di tali memorie risulta sufficiente ad immagazzinare gli hit di 16 eventi. La corretta ricostruzione di tutti gli eventi selezionati dal trigger di primo livello è, dunque, impedita dalla saturazione della Pending Level1 FIFO. La profondità di tale memoria è, però, fissata dalle esigenze dei chip di front-end, incapaci di processare più di 16 LEVEL1 contemporaneamente; le inefficienze evidenziate in

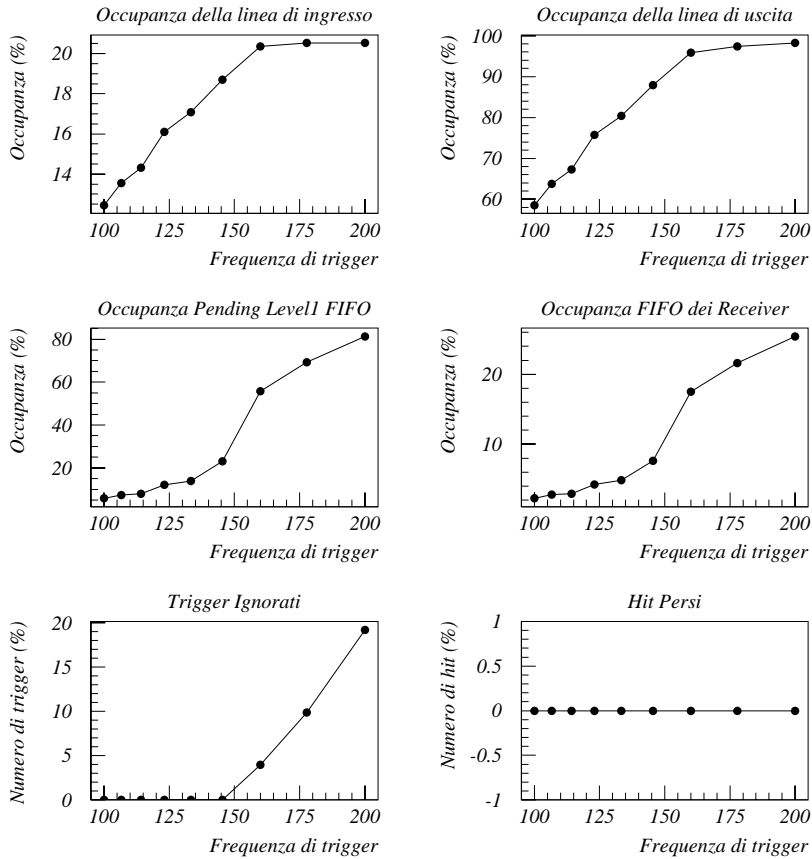


Figura 4.9: Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 80 Mbit/s.

questa analisi risultano quindi ineliminabili.

Lo studio svolto variando le condizioni di irraggiamento del rivelatore mostra, invece, come la configurazione esaminata risulti adatta a gestire fino a 40 eventi di fondo senza perdere dati. Dopo tale valore si ha, invece, un costante aumento del numero di trigger ignorati e di hit persi.

Conclusioni

Ciò che risulta evidente in tutte le analisi presentate finora è che, se da un lato le linee seriali di comunicazione tra front-end e Receiver non arrivano mai a saturare, tutte le perdite di dati corrispondono immancabilmente a condizioni in cui venga saturata la banda passante della linea seriale di uscita. Si può infatti notare che, al verificarsi di tale condizione, si ha un brusco aumento dell'occupazione della Pending Level1 FIFO e delle memorie

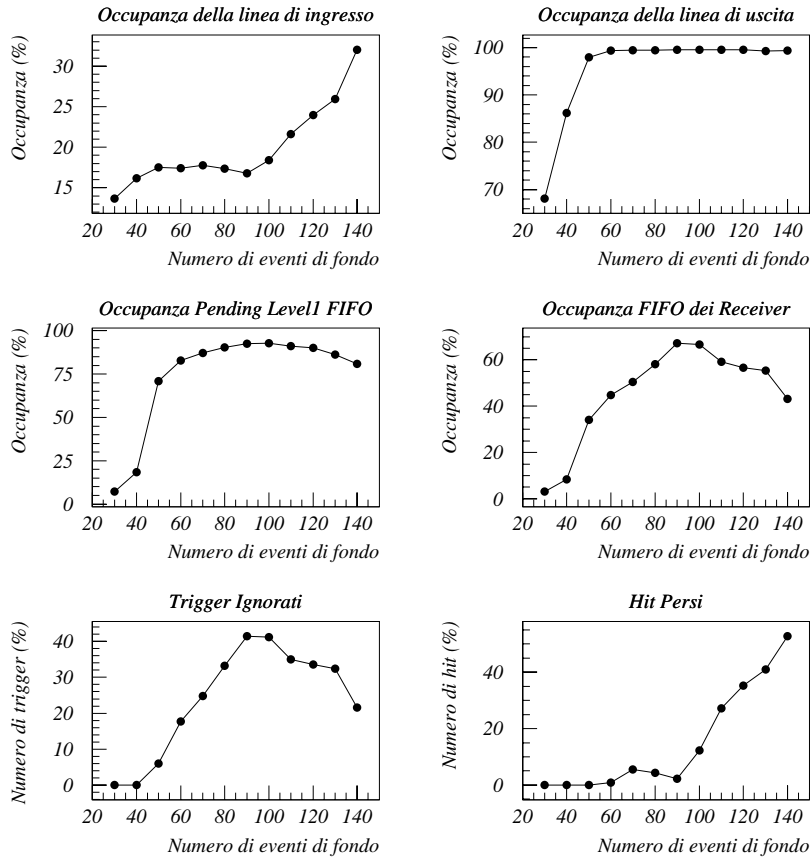


Figura 4.10: Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: configurazione con memorie da 128 parole e velocità di uscita di 80 Mbit/s.

dei Receiver, con conseguente perdita di dati. Alla luce di tale osservazione risulta, quindi, evidente l'importanza di avere la massima banda passante possibile sulla linea di uscita.

Di conseguenza, nel confronto fra le due configurazioni analizzate, si è rivelata, come atteso, molto più robusta quella con 160 Mbit/s; quest'ultima risulta, quindi, la candidata ideale per l'implementazione del Module Controller Chip.

Ciononostante, è importante aver dimostrato che l'analoga soluzione con uscita a 80 Mbit/s, pur non essendo altrettanto affidabile, è sufficientemente efficiente nelle condizioni nominali previste per LHC.

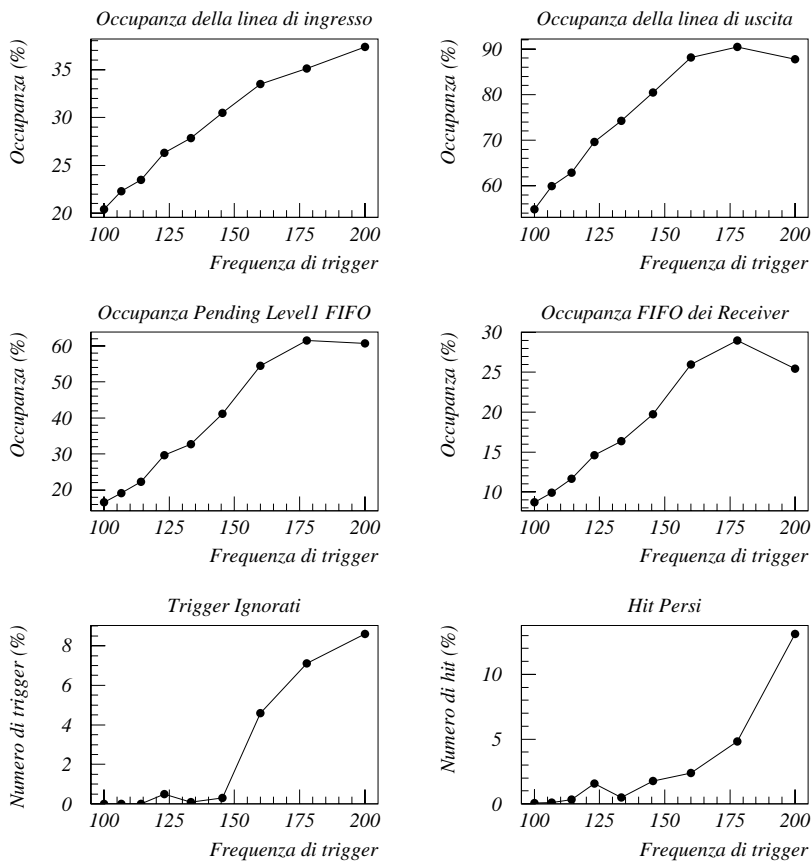


Figura 4.11: Risultati dello studio in funzione della frequenza di trigger: caso della geometria con raggio del b -layer pari a 4 cm.

4.2.3 Geometria del rivelatore ed efficienza

Le analisi volte a valutare la robustezza del Module Controller Chip, sono state ripetute su eventi simulati per la geometria descritta nel paragrafo 4.1.2. Tale operazione è stata svolta esclusivamente per la configurazione con FIFO da 128 parole e velocità di uscita di 160 Mbit/s, allo scopo di verificarne l'efficienza nel caso in cui variazioni della geometria causino un aumento dell'occupanza media dei singoli pixel. I risultati ottenuti sono riportati in figura 4.11 e 4.12

Come si può notare da tali grafici, la configurazione analizzata, oltre a risultare completamente efficiente in condizioni nominali, mostra, anche in questo caso, una discreta robustezza, arrivando a gestire senza perdere dati frequenze di trigger pari a 110 kHz e collisioni in cui vengano prodotti 40 eventi di fondo.

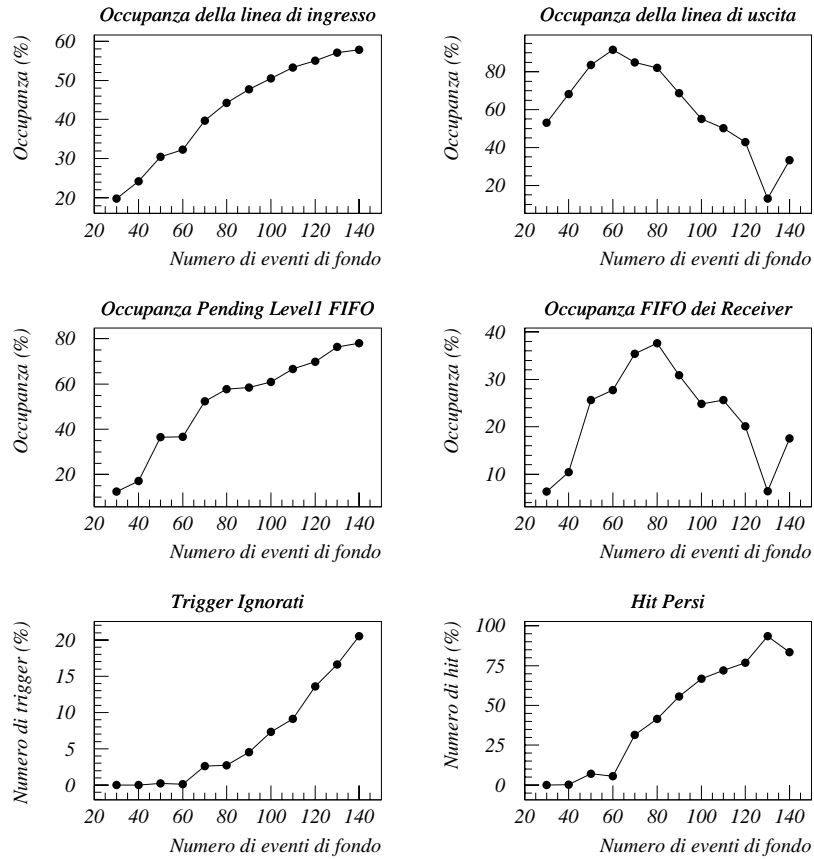


Figura 4.12: Risultati dello studio in funzione del numero di processi di fondo: caso della geometria con raggio del b -layer pari a 4 cm.

Un'ultima osservazione merita l'occupanza della linea seriale di uscita e delle FIFO dei Receiver, il cui andamento è mostrato in figura 4.12. Tale quantità, contrariamente a quanto osservato nei risultati delle analisi precedenti, dopo un brusco aumento iniziale, tende a diminuire rapidamente. Ciò accade poiché, al crescere del numero di processi di fondo, la dimensione media degli eventi trasmessi dai front-end diventa tale da mantenere in costante stato di overflow o bloccaggio le FIFO dei Receiver. Tale ipotesi è confermata dal grafico che riporta la percentuale di hit persi; in esso si osserva, infatti, in corrispondenza del minimo per l'occupanza dei Receiver, un picco pari a circa 90%.

4.3 Conclusioni

Le simulazioni presentate in questo capitolo dimostrano che la configurazione con FIFO da 128 parole e velocità di trasferimento in uscita pari a 160 Mbit/s, oltre ad essere perfettamente efficiente in condizioni nominali, gode di un margine che la rende particolarmente robusta rispetto a variazioni delle condizioni esterne e della geometria del rivelatore. I parametri di tale configurazione saranno, dunque, quelli che si cercherà di implementare nei futuri prototipi del chip reale.

Inoltre, è stato dimostrato che l'analoga configurazione con velocità di trasferimento di 80 Mbit/s, pur non essendo altrettanto robusta, risulta pienamente in grado di far fronte al carico di lavoro atteso in condizioni nominali. Questo risultato, meno prevedibile del precedente, è molto confortante riguardo all'efficienza ed alla solidità del processo di ricostruzione svolto dal Module Controller Chip. Si ha, infatti, la sicurezza di poter sempre contare su una soluzione efficiente, anche nel caso in cui alcuni moduli, a causa di guasti ad una delle due linee seriali, fossero obbligati a trasferire su una sola delle due linee di uscita gli eventi ricostruiti.

Capitolo 5

Il trigger di LEVEL2

In questo capitolo viene descritto il principio di funzionamento di una delle componenti del trigger di secondo livello di ATLAS. Tale componente ha lo scopo di fornire, in tempi dell'ordine della decina di millisecondi, una ricostruzione di tutte le tracce nel rivelatore a pixel.

5.1 La ricostruzione di traccia e b-tagging

Il sistema di trigger di ATLAS si basa sulle cosiddette “Regioni di Interesse” (RoI), ovvero su porzioni limitate del rivelatore che vengono identificate, evento per evento, come quelle che contengono informazioni potenzialmente utili dal punto di vista della fisica. Di conseguenza, la maggior parte degli algoritmi proposti per il trigger di secondo livello (che come già detto è un trigger software con un tempo di latenza inferiore a 10 *ms*) agisce solo all'interno delle RoI definite dal trigger di primo livello; in questo modo si riducono drasticamente sia i tempi di elaborazione sia la mole di dati che occorre trasferire dal sistema di data-acquisition alla batteria di processori dedicata al LEVEL2.

Esistono, tuttavia, alcuni processi per cui il meccanismo delle regioni di interesse non è applicabile. In particolare, la selezione di decadimenti rari degli adroni con beauty produce tracce di energia troppo bassa per essere rivelata dal trigger di primo livello. Come conseguenza, tali eventi vengono selezionati a LEVEL1 da un muone di elevato impulso trasverso la cui direzione non è tuttavia correlata con quella dell'adrone di cui si vuole studiare il decadimento. È quindi necessario eseguire, al secondo livello di trigger, una ricostruzione di traccia sull'intero rivelatore in modo da identificare e selezionare i soli modi di decadimento realmente interessanti.

Per questo motivo è stato realizzato un algoritmo, detto PixTrig, che utilizza i soli punti misurati dal rivelatore a pixel e che consente di ottenere, in tempi dell'ordine della latenza del LEVEL2, una ricostruzione di traccia di discreta qualità. PixTrig fornisce, in particolare, una buona risoluzione

sul parametro di impatto, in quanto utilizza punti con elevata precisione intrinseca e campionati vicino alla zona di interazione. Questa caratteristica lo rende particolarmente adatto all'individuazione di tracce che provengono da vertici secondari di decadimento, come quelli dei b -adroni. Tale caratteristica può essere messa a frutto, oltre che nella selezione di decadimenti esclusivi del b , anche per il riconoscimento dei jet provenienti da quark b rispetto a quelli provenienti da quark leggeri o gluoni (b -tagging).

5.2 PixTrig

Lo scopo di PixTrig è fornire un veloce algoritmo per la ricostruzione di traccia, utilizzabile dal trigger di secondo livello nel contesto della B -fisica. Utilizzare come oggetto dell'analisi i punti spaziali individuati dal rivelatore a pixel è una scelta naturale, vista la precisione richiesta nella valutazione del parametro d'impatto e degli altri parametri tridimensionali delle tracce. Inizialmente, PixTrig è stato implementato utilizzando solamente i tre piani contenuti nel barrel del rivelatore a pixel. Avendo solamente tre punti è possibile applicare un veloce algoritmo combinatorio ed estrarre i parametri delle tracce senza eseguire alcun fit. Tutti i punti appartenenti al cilindro più interno (b -layer) vengono collegati a quelli sul secondo piano; nel caso la linea così ottenuta abbia un parametro d'impatto $(\Delta R\Phi_{ext}, \Delta Z_{ext})$ entro una soglia fissata, essa viene estrapolata al terzo. Se esiste un punto sufficientemente vicino $(\Delta R\Phi_3, \Delta Z_3)$, la terna ottenuta è utilizzata per identificare una possibile traccia. L'impulso trasverso ed il parametro d'impatto sono stimati a partire dall'equazione del cerchio passante per i tre punti nel piano $R\Phi$.

Il raggio d'azione limitato al solo rivelatore a pixel, se da un lato permette di utilizzare un algoritmo semplice, d'altro canto, ne comporta anche un'elevata sensibilità alle inefficienze del rivelatore stesso. Per questo motivo, nell'attuale implementazione, i piani del rivelatore fisico sono stati sostituiti da cosiddetti "piani logici", insiemi di moduli nei quali ricercare i punti delle tracce da ricostruire. Questo approccio ha consentito di estendere l'algoritmo alla zona degli end-cap e, in futuro, supporterà una semplice integrazione di punti spaziali provenienti da altri rivelatori, per migliorare l'efficienza complessiva dell'algoritmo.

PixTrig, scritto in C++, fa parte di CTrig, un pacchetto di simulazione del trigger nel contesto della B -fisica. In tal modo le tracce prodotte da SimPix possono essere facilmente confrontate con quelle prodotte da altri algoritmi o utilizzate come punto di partenza per una ricostruzione di traccia completa nell'Inner Detector.

5.2.1 L'algoritmo di ricostruzione di traccia

Nei paragrafi seguenti sono descritti i principali passi del processo di ricostruzione di traccia, alla fine del quale le informazioni ottenute possono essere passate ad algoritmi che ne migliorino la qualità, oppure a moduli che svolgono analisi specifiche come il b -tagging.

Costruzione delle tavole di geometria

Come già detto, PixTrig esegue la ricostruzione delle tracce utilizzando tre piani logici. Questi piani sono insiemi arbitrari di moduli, ordinati per valori crescenti di raggio. Il programma non è limitato a gestire una sola terna di piani alla volta; i diversi piani possono sovrapporsi e ciascun modulo può appartenere a più d'uno di essi, anche all'interno della stessa terna. La flessibilità nella definizione dei piani è stata implementata per poter utilizzare l'algoritmo indipendentemente dalla geometria del rivelatore. Nel caso specifico del rivelatore a pixel, ogni modulo del b -layer viene utilizzato come primo piano logico; tale scelta è motivata dal fatto che il b -layer fornisce le informazioni più importanti al fine della valutazione del parametro d'impatto ed offre una completa copertura in η . Per ciascuno dei 221 moduli del b -layer, il secondo ed il terzo piano vengono definiti utilizzando le informazioni Montecarlo sulle tracce: un modulo viene incluso nel secondo (terzo) piano se esiste almeno una traccia avente il proprio secondo (terzo) punto spaziale in quel modulo. La dimensione delle terne di piani influisce fortemente sulle prestazioni dell'algoritmo, in quanto usare piccole regioni che contengono pochi punti rende più veloce la ricerca combinatoria e diminuisce il numero di tracce false. Poiché la dimensione in $R\Phi$ dei piani logici dipende dal taglio effettuato su p_T , è importante utilizzare una corretta definizione delle tavole di geometria per la particolare soglia applicata.

Preparazione dei punti spaziali

Gli hit prodotti dal rivelatore devono essere preparati, prima di poter essere utilizzati per la ricerca delle tracce. Tale preparazione consiste nel raggruppare tutti gli hit presumibilmente prodotti dalla stessa traccia e nel calcolare, per ognuno dei gruppi (cluster) formati, le corrette coordinate spaziali.

L'attuale implementazione di PixTrig prevede che tale operazione venga svolta direttamente da CTrig, al di fuori dei singoli moduli di ricostruzione. Questo approccio corrisponde all'idea che la preparazione dei punti spaziali sia esterna al trigger di secondo livello, ma venga eseguita a livello dei ROB da un modulo del software di acquisizione, o da hardware specifico.

PixTrig risulta relativamente sensibile all'algoritmo di creazione dei cluster, poiché le imperfezioni di tale procedura possono produrre più punti per piano corrispondenti alla stessa traccia, portando ad un aumento del tempo di calcolo e del numero di tracce false.

Ricerca delle tracce

Per ogni evento, la prima operazione svolta da PixTrig è quella di caricare i punti spaziali e classificarli secondo la definizione dei piani logici. PixTrig può funzionare in due modalità, dette RoI e Full Scan; nel primo caso vengono utilizzati solamente i punti spaziali contenuti nelle RoI, nel secondo caso sono letti i punti prodotti dall'intero rivelatore.

Il processo di ricerca delle tracce procede, poi, indipendentemente per ogni terna di piani; nella versione attuale tale operazione è svolta in modo sequenziale, ma si presta facilmente ad essere parallelizzata. La retta congiungente ciascuna coppia di punti nel primo e secondo piano viene estrapolata alla linea del fascio ed accettata se sono soddisfatte le condizioni

$$Z_{12} = |z_{beam} - z_{vertex}| < \Delta Z_{ext}$$

$$R\Phi_{12} = |r\phi_{beam} - r\phi_{vertex}| < \Delta R\Phi_{ext}$$

dove z_{beam} e $r\phi_{beam}$ sono le coordinate del punto della retta più vicino al vertice, le cui coordinate sono, invece, z_{vertex} e $r\phi_{vertex}$. È previsto che la posizione in $R\Phi$ del vertice primario corrisponda a $(x_{vertex}, y_{vertex}) = (0, 0)$ e sia nota con una piccola indeterminazione; al contrario, z_{vertex} , cioè la posizione del punto di interazione lungo la linea del fascio, assume valori distribuiti attorno a 0 con un'indeterminazione di circa 15 cm. Nel caso non sia disponibile alcuna informazione su quest'ultima quantità, si pongono $z_{vertex} = r\phi_{vertex} = 0$ e ΔZ_{ext} pari a 15 cm.

Le rette accettate dopo questi tagli vengono estrapolate e confrontate con ciascuno dei punti contenuti nel terzo piano; l'estrapolazione viene effettuata a R definito per la parte centrale e a Φ definito per le due parti in avanti. La terna di punti viene accettata come possibile traccia se

$$R\Phi_3^2 = |x_{extrap} - x_3|^2 + |y_{extrap} - y_3|^2 < \Delta R\Phi_3^2$$

$$Z_3 = |z_{extrap} - z_3| < \Delta Z_3$$

dove x_{extrap} , y_{extrap} e z_{extrap} sono le coordinate del punto estrapolato e x_3 , y_3 e z_3 sono quelle del punto sul terzo piano. Il taglio su Z_3 viene effettuato solamente la parte centrale perchè, nell'altro caso, $z_{extrap} = z_3$ per costruzione.

Nella seguente tabella sono riportati i valori per i quattro tagli, ottenuti con un processo di ottimizzazione.

	$p_T > 1 \text{ GeV}$
ΔZ_{ext} Barrel	0.4 cm
$\Delta R\Phi_{ext}$ Barrel	0.12 cm
ΔZ_3 Barrel	0.06 cm
$\Delta R\Phi_3$ Barrel	0.10 cm
ΔZ_{ext} End-Cap	0.4 cm
$\Delta R\Phi_{ext}$ End-Cap	0.4 cm
$\Delta R\Phi_3$ End-Cap	0.5 cm

In generale, ΔZ_3 dipende essenzialmente dalla risoluzione del rivelatore, ΔZ_{ext} dalla conoscenza della posizione del vertice primario lungo l'asse del fascio, $\Delta R\Phi_{ext}$ e $\Delta R\Phi_3$ dall'accettanza richiesta in p_T .

Gestione delle sovrapposizioni

Alla fine della ricerca non c'è alcuna garanzia che ciascun punto spaziale appartenga ad una singola traccia. Per questa ragione è necessario eliminare le sovrapposizioni e concludere il processo con un uso non ambiguo dei cluster. La rimozione delle sovrapposizioni viene effettuata raggruppando le tracce che condividono almeno un punto; questo raggruppamento viene eseguito seguendo una regola associativa, in modo che due tracce dello stesso gruppo possano non avere punti in comune se entrambe ne condividono uno con una terza. Le terne di ogni gruppo vengono poi ordinate secondo la seguente variabile

$$D = |x_{extrap} - x_3|^2 + |y_{extrap} - y_3|^2 + |z_{extrap} - z_3|^2.$$

La traccia con il minore valore di D viene tenuta, quelle che condividono un punto con essa sono scartate, mentre le altre vengono nuovamente raggruppate per ripetere la procedura.

Tale metodo di rimozione delle ambiguità, pur funzionando bene, ha l'ovvia conseguenza di favorire tracce con elevato p_T , meglio approssimate da una retta e caratterizzate da piccoli valori di D . Questo fatto può risultare problematico in alcune analisi; per tale motivo, specialmente quando PixTrig viene utilizzato come "seme" per altri algoritmi, è possibile inibire la rimozione delle ambiguità e non rigettare alcuna delle tracce ricostruite.

Ricostruzione delle tracce

Ciascuna terna formata dall'algoritmo di ricerca identifica una circonferenza nel piano $R\Phi$, dal quale possono essere stimati i valori di p_T , del parametro d'impatto nel piano trasversale al fascio (d_0) e della direzione iniziale ϕ . Il segno attribuito a d_0 è quello del prodotto scalare tra la direzione del fiotto a cui appartiene la traccia e la congiungente il vertice primario con il punto di massimo avvicinamento.

I valori del parametro d'impatto lungo la direzione Z (z_0) e della direzione iniziale θ vengono stimati, invece, approssimando con una retta i tre punti nel piano RZ .

5.2.2 Ricostruzione della coordinata Z del vertice primario

Il taglio sulla variabile Z_{12} è molto efficace nel rimuovere combinazioni spurie, che non puntano al vertice primario; inoltre può rigettare tracce che non hanno origine dal vertice in esame, ma provenienti da eventi di fondo. Oltre alla riduzione delle tracce false, questa selezione ha due effetti positivi: riduce il tempo di elaborazione, eliminando molte coppie di punti senza estrapolarle al terzo piano; aumenta l'efficienza di ricostruzione, evitando che cluster utilizzati in associazioni erranee risultino inutilizzabili per le tracce corrette. Il taglio su Z_{12} è possibile, però, solamente se la coordinata Z del vertice di interazione è nota con buona precisione.

Per tutti gli eventi selezionati dal trigger di primo livello grazie alla presenza di un muone con $p_T > 6$ GeV/c, PixTrig stesso può fornire un'informazione sulle coordinate del vertice primario. Il principio è quello di effettuare una ricerca di traccia all'interno della RoI individuata dal muone, utilizzando un taglio su p_T e con la richiesta aggiuntiva che la direzione della congiungente i primi due punti corrisponda a quella del μ , entro la tolleranza. Tra tutte le tracce ricostruite viene poi selezionata quella con p_T maggiore, ed il suo z_0 è assunto come posizione del vertice; vengono automaticamente scartate le tracce con $p_T < 3$ GeV/c. Questa procedura, svolta all'inizio delle operazioni del trigger di secondo livello e successivamente usata da PixTrig, applicata ad un campione di eventi $b \rightarrow \mu(6 \text{ GeV}/c) + X$, è in grado di trovare un candidato μ nel 95.7% dei casi e viene eseguita in 0.5 ms su un processore Pentium III 500 MHz. La risoluzione ottenuta sulla coordinata Z del vertice è di $670 \mu\text{m}$ e, nel 99% dei casi, il valore di z_0 della traccia selezionata differisce per meno di 5 mm da quello del vertice primario reale. Quando il trigger di primo livello non fornisce informazioni su alcun muone, ad esempio nel caso la RoI sia selezionata dai calorimetri, è ugualmente possibile ricostruire a posteriori la posizione del vertice, effettuando una media della coordinata z_0 di tutte le tracce ricostruite. Questa operazione, pur non migliorando le prestazioni in termini di tempo d'esecuzione, garantisce una ulteriore selezione sul campione finale, aumentando l'efficienza dell'algoritmo.

5.2.3 L'algoritmo per il b -tagging

Le tracce ricostruite da PixTrig possono, infine, essere utilizzate per selezionare i jet prodotti nei decadimenti di quark b . In tal caso, viene disabilitata la possibilità di ricostruire la posizione del vertice a partire dal muone selezionato dal trigger di LVL1. Infatti, gli eventi caratterizzati da più jet,

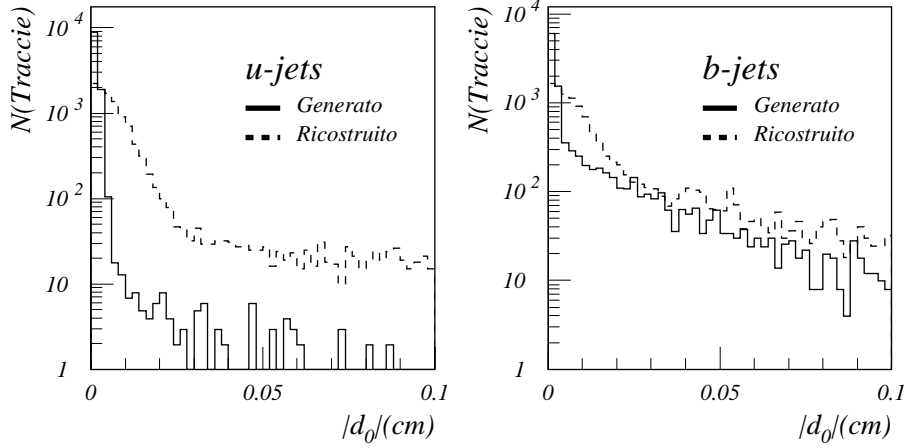


Figura 5.1: Distribuzione del valore assoluto del parametro d'impatto d_0 per b -jet ed u -jet.

campione di interesse per questo tipo di selezione, contengono solitamente b -jet di bassa energia, che difficilmente producono un muone in grado di superare la soglia del trigger di primo livello.

Le tracce provenienti da b -jet ed u -jet vengono distinte in base al valore del parametro di impatto d_0 nel piano $R\Phi$. Poiché gli adroni contenenti quark b hanno una vita media finita, le tracce prodotte nel loro decadimento sono caratterizzate da un valore di d_0 maggiore di quello delle tracce provenienti da u -jet, originate prevalentemente nel vertice primario. In figura 5.1 è mostrata la distribuzione del valore assoluto di d_0 per b -jet ed u -jet.

Il criterio più semplice consisterebbe nel discriminare i fiotti in base alla percentuale di tracce aventi parametro d'impatto superiore ad una soglia fissata. Questa strategia, oltre ad essere poco flessibile, non garantisce un'elevata efficienza né una sufficiente reiezione, visto il piccolo numero di tracce con parametro di impatto elevato.

Un algoritmo più efficace può essere costruito utilizzando il metodo statistico chiamato Likelihood Ratio, descritto in maggior dettaglio nel prossimo sottoparagrafo. Tale metodo prevede di calcolare, per ogni traccia, il rapporto tra le densità di probabilità che essa provenga da un b -jet o da un u -jet: $f_b(S_i)/f_u(S_i)$; viene poi calcolato il prodotto W di tali rapporti su tutte le tracce ricostruite nel fiotto e viene definita la variabile $X = W/(1 + W)$, in base al cui valore si opera la selezione. I b -jet (u -jet) sono, infatti, caratterizzati da $X \simeq 1$ ($X \simeq 0$).

Il campione standard su cui vengono effettuati gli studi di efficienza degli algoritmi di b -tagging è composto da b -jet (segnale) e u -jet (fondo) provenienti dal decadimento di un bosone di Higgs, con massa pari a $100 \text{ GeV}/c^2$, prodotto in associazione con un W (eventi $WH(100)$). Tale scelta deriva dal fatto che il potenziale di scoperta del bosone di Higgs tramite decadimenti in

coppie $b\bar{b}$ è significativo in un intervallo di massa che va da 90 a 130 GeV/c². L'efficienza di un algoritmo di b -tagging su singolo jet viene, infine, caratterizzata tramite due quantità:

- la reiezione degli u -jet, definita come l'inverso dell'efficienza per tali jet ($R_u = 1/\epsilon_u$), in funzione dell'efficienza per i b -jet (ϵ_b) su eventi $WH(100)$;
- la reiezione R_u , fissata l'efficienza, su differenti intervalli di E_T ed η . Questo tipo di informazione fornisce una semplice stima della reiezione attesa per un determinato canale fisico, una volta nota la cinematica.

Il metodo del Likelihood Ratio

Il Likelihood Ratio è un metodo statistico che permette di separare due o più classi di eventi in base a un certo insieme di variabili caratteristiche.

La variabile di Likelihood Ratio, W , è il rapporto delle densità di probabilità di due ipotesi alternative, per un dato evento. Nel caso del b -tagging la variabile di Likelihood Ratio è stata definita come $W = S(s)/S(b)$, cioè il rapporto delle densità di probabilità per il segnale (b -jet) ed il fondo (u -jet). Tale variabile è comunemente utilizzata per ottenere la miglior separazione tra segnale e fondo, in termini di una sola variabile, nei fit in cui si vuole estrarre la percentuale di segnale in un campione dato. La stessa variabile può essere, però, altrettanto efficacemente usata, come nel caso del trigger di b -jet, per selezionare direttamente il segnale (richiedendo per esempio che tale variabile sia maggiore di un valore dato).

Le distribuzioni di densità di probabilità che costituiscono il Likelihood Ratio nel caso dell'applicazione al b -tagging sono funzioni dei parametri di impatto di tutte le tracce che formano i jet: $s(ip_1, ip_2, ip_3, \dots)$ per i jet di b e $b(ip_1, ip_2, ip_3, \dots)$ per i jet di u :

$$W = \frac{s(ip_1, ip_2, ip_3, \dots, ip_n)}{b(ip_1, ip_2, ip_3, \dots, ip_n)} \quad (5.1)$$

Il calcolo esatto delle funzioni s e b è difficoltoso in quanto richiederebbe una simulazione pressochè infinita (se si vuole popolare ragionevolmente un cubo n dimensionale occorrono circa 100 punti per dimensione e quindi n^{100} tracce); inoltre il numero di tracce per jet non è fissato a priori.

Tuttavia se supponiamo che le variabili siano indipendenti, il rapporto tra le densità di probabilità diventa il prodotto dei rapporti delle singole densità di probabilità:

$$W = \prod_{i=1}^n \frac{s(ip_i)}{b(ip_i)} \quad (5.2)$$

che è molto più semplice da calcolare.

Nella realtà le variabili (parametri di impatto) sono correlate in maniera

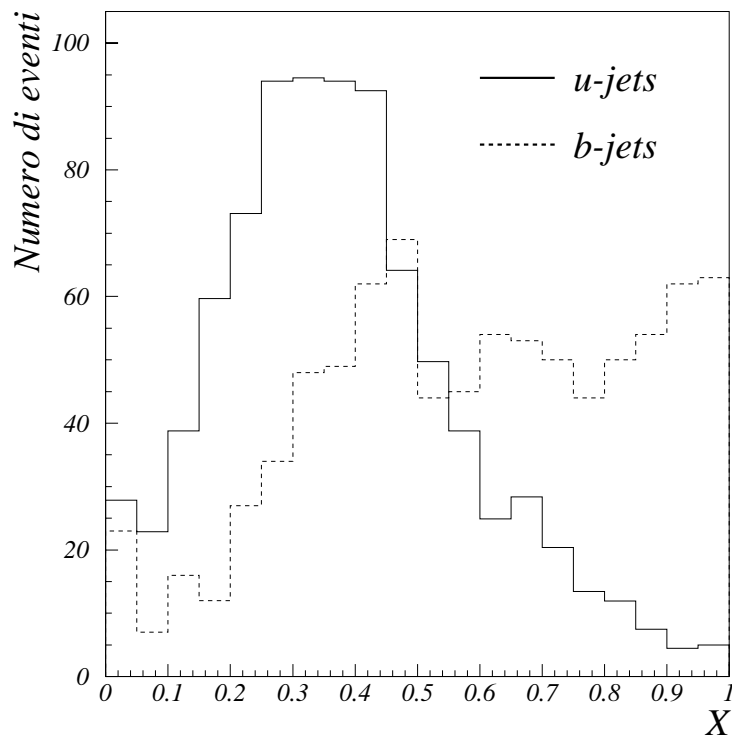


Figura 5.2: Variabile discriminante X utilizzata per il b -tagging.

complicata: la correlazione dipende dal tempo proprio dell' adrone con beauty e dalla cinematica di decadimento; si può però dimostrare che, trascurando queste correlazioni, non si commettono errori ma si diminuisce leggermente il poter discriminante della variabile.

La variabile W così definita, può assumere un range di valori che vanno da 0 (fondo) a $+\infty$ (segnale). Per questioni di praticità è utile avere a disposizione una variabile definita in un intervallo finito; per questo viene utilizzata la variabile

$$X = \frac{W}{1+W} \quad (5.3)$$

che assume valori tra 0 e 1.

Il segnale (b -jet) tende a concentrarsi a $X = 1$, mentre il fondo (u -jet) a $X = 0$, come illustrato in figura 5.2.

Capitolo 6

Efficienza del rivelatore a pixel

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle simulazioni volte a valutare l'impatto delle inefficienze dell'MCC sull'algoritmo di ricostruzione di traccia. Le condizioni esterne simulate sono quelle più estreme, cioè quelle di alta luminosità ad LHC.

6.1 La simulazione

6.1.1 Scopo della simulazione

Nel capitolo 4, dedicato allo studio dell'efficienza di un singolo modulo del rivelatore a pixel di ATLAS, è stata indicata la configurazione del Module Controller Chip maggiormente adatta ad essere implementata realmente. Tale soluzione prevede FIFO da 128 parole e velocità di trasferimento lungo la linea seriale di uscita pari a 160 Mbit/s. Questa configurazione si è dimostrata particolarmente robusta ed efficiente, tanto da essere in grado di far fronte, senza alcuna perdita di dati, a condizioni estreme sia per il carico di lavoro dei singoli moduli, sia per la frequenza di selezione del trigger di primo livello. Inoltre, l'analoga configurazione in cui è utilizzata solamente una linea di uscita, pur risentendo maggiormente di eventuali variazioni delle condizioni esterne, è risultata pienamente efficiente in condizioni nominali. La realizzazione di entrambe le soluzioni è, però, subordinata alla possibilità di sfruttare, per l'implementazione reale dei chip, una tecnologia elettronica mai utilizzata nei prototipi costruiti in precedenza, e della quale andrà valutata attentamente la resistenza alle radiazioni. La tecnologia utilizzata fino ad ora, infatti, pur essendo garantita per livelli di irraggiamento simili a quelli previsti in 10 anni di lavoro ad LHC, non consente una miniaturizzazione sufficiente ad ottenere FIFO di profondità superiore alle 32 parole. Inoltre, come detto in precedenza, non è finora stata implementata realmen-

te la possibilità di utilizzare due linee di uscita in modo da ottenere una velocità di trasferimento pari a 160 Mbit/s. Tale funzione è attualmente in fase di sviluppo e sarà probabilmente implementata nella prossima generazione di prototipi, ma, al presente, non si ha alcun tipo di garanzia sul suo funzionamento.

In tale ottica risulta particolarmente importante poter valutare quale sia l'impatto, sullo studio di canali fisici interessanti, delle inefficienze riscontrate in caso si verificano guasti alle linee seriali di uscita o si utilizzino soluzioni meno efficienti di quelle indicate come ottimali, ma che possono essere implementate utilizzando tecnologie elettroniche di cui è stata provata la robustezza. In particolare, verrà analizzato, tramite il programma SimPix, il caso in cui il Module Controller Chip sia dotato di FIFO da 32 parole e trasferimento in uscita a 80 Mbit/s.

Per avere una stima di quanto la possibilità di ricostruire il contenuto fisico dei dati prodotti nel rivelatore a pixel sia compromessa da eventuali perdite di informazione dovute all'elettronica di lettura, verrà studiata l'efficienza dell'algoritmo di identificazione dei quark b descritto nel capitolo 5. Tale algoritmo, operante nel contesto del trigger di secondo livello, è progettato per identificare, esclusivamente tramite le informazioni lette dal rivelatore a pixel, i jet prodotti nel decadimento di adroni contenenti quark b (b -jet), distinguendoli da quelli generati nella frammentazione di quark più leggeri. I due casi vengono distinti sulla base della misura del parametro d'impatto delle tracce ricostruite. Ci si aspetta, quindi, che l'efficienza del b -tagging dipenda fortemente dalla qualità dei dati provenienti dal rivelatore a pixel e, in particolare, dal numero di tracce ricostruite e dalla risoluzione ottenuta sui loro parametri. Inoltre, la corretta valutazione del parametro d'impatto delle tracce dipende soprattutto dagli hit più prossimi al fascio, misurati dal b -layer, parte del rivelatore nella quale si ha la massima densità di tracce e che, quindi, risulta maggiormente soggetta alle inefficienze dell'elettronica di lettura.

Da queste considerazioni deriva la scelta di utilizzare l'efficienza dell'algoritmo di b -tagging come parametro in base al quale valutare le ricadute sulla ricostruzione di processi fisici interessanti di eventuali inefficienze verificatesi durante il processo di lettura dati.

6.1.2 Le condizioni simulate

Campioni utilizzati

Uno studio su un algoritmo di b -tagging deve essere svolto, in generale, su un campione di eventi contenenti b -jet e jet prodotti nella frammentazione di quark leggeri. Su questi ultimi è necessario avere una maggiore statistica, per non perdere precisione sulla stima dell'efficienza di identificazione dei b -jet, anche nel caso che un'elevata reiezione degli u -jet assottigli fortemente

la popolazione studiata.

Le analisi presentate in questo capitolo sono state effettuate su un campione di 500 b -jet e 1000 u -jet; in particolare, i b -jet sono prodotti dal decadimento di un bosone di Higgs prodotto insieme ad un W . Per il bosone di Higgs simulato è stata ipotizzata una massa pari a $100\text{GeV}/c^2$ (eventi $HW(100)$), valore inferiore al limite posto, sperimentalmente, a $113.2\text{GeV}/c^2$ dagli esperimenti LEP. Tale ipotesi, pur essendo estremamente improbabile, è stata fatta per studiare il comportamento dell'algoritmo di b -tagging in una regione di massa in cui il modo di decadimento dominante per la ricerca dell'Higgs risulta essere $H \rightarrow b\bar{b}$; per lo studio di tale canale è indispensabile un'efficiente meccanismo di identificazione dei b -jet. Questa regione di massa verrà comunque studiata a LHC per confermare i risultati di LEP, e potrebbe essere cruciale se fossero confermate le indicazioni attuali che, come già detto, suggeriscono un Higgs di massa attorno ai $115 - 120\text{GeV}/c^2$; tale studio è inoltre rilevante nel contesto delle estensioni supersimmetriche del Modello Standard.

Parametri della simulazione

Al contrario di quanto fatto nel capitolo 4, le simulazioni presentate in questo capitolo sono state svolte per una sola configurazione del Module Controller Chip. Nella fattispecie, è stato analizzato il caso in cui siano previste memorie da 32 parole per i Receiver ed una velocità di trasferimento in uscita pari a 80 Mbit/s.

Inoltre, per motivi tecnici, si è utilizzata per la ricostruzione di traccia la sola parte "barrel" del rivelatore a pixel, che comunque è quella che fornisce il maggiore contributo all'accettanza complessiva.

L'efficienza di b -tagging è stata valutata in funzione dell'occupanza media dei moduli del rivelatore. Nel capitolo dedicato alla caratterizzazione funzionale dei singoli moduli, è risultato evidente come, un'occupanza superiore a quella attesa in condizioni nominali, sia uno dei principali fattori in grado di determinare inefficienze nel processo di lettura dati. Nelle analisi svolte, tale quantità è stata fatta variare agendo sul numero di processi di fondo sovrapposti, in media, agli eventi del campione utilizzato. I risultati ottenuti hanno, però, una validità più generale, proprio perchè riportati in funzione dell'occupanza media dei pixel. In tal modo si ottengono informazioni riguardanti gli effetti, non solo di eventuali fluttuazioni del fondo, ma anche di tutti i fenomeni che causano un aumento del numero medio di hit per pixel. Ad esempio, le conclusioni raggiunte in questo studio restano valide anche nel caso di variazioni nella quantità di rumore prodotta all'interno dei sensori di silicio.

Sono state analizzate tre differenti condizioni, nelle quali il fondo aggiunto agli u -jet ed ai b -jet è tale da dare, in tutti i casi, una distribuzione degli hit analoga a quella riportata in figura 4.1, ma scalata in modo da avere,

rispettivamente, un'occupazione media di $3.9 \cdot 10^{-4}$, $6.0 \cdot 10^{-4}$ e $7.8 \cdot 10^{-4}$ per l'anello centrale del *b*-layer.

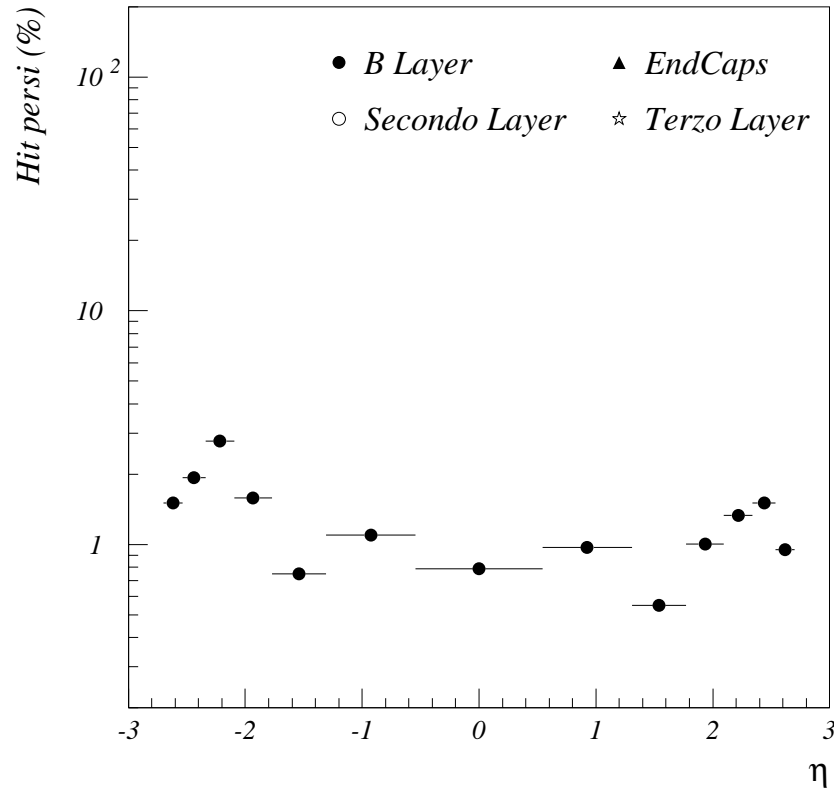


Figura 6.1: Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del *b*-layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$.

Procedura seguita

In ciascuno dei tre casi studiati, gli hit prodotti nei processi di fondo sono stati sovrapposti, in diverse quantità, a quelli provenienti dai jet campione, tramite un apposito modulo di SimPix. I file prodotti tramite questa procedura sono stati utilizzati come stimolo per il modulo di simulazione di SimPix, configurato in modo da utilizzare un modello dell'MCC con FIFO da 32 parole e velocità di trasferimento di 80 Mbit/s, e da riprodurre il comportamento dei moduli dell'intero rivelatore. Anche in questo studio, come già per le misure riportate nel capitolo 4, è stato utilizzato un modello ideale per i chip di front-end, mentre per il trigger di primo livello è stata

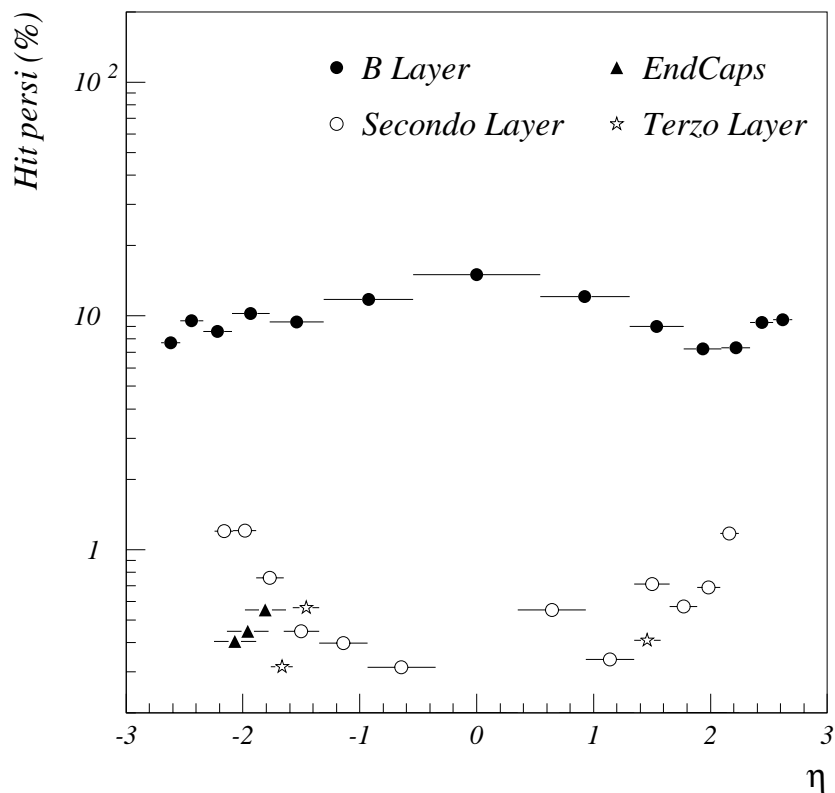


Figura 6.2: Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$.

selezionata una frequenza di 100 kHz, corrispondente al massimo previsto. Dopo aver analizzato il comportamento di tutti i moduli del rivelatore, sono state raccolte le uscite degli MCC simulati e, a partire da esse, sono stati prodotti file analoghi a quelli utilizzati come stimolo, ma che tenessero conto delle perdite di dati occorse nel processo di acquisizione dati.

A questo punto, i file originali, utilizzati come stimolo per SimPix, e quelli ricostruiti, sono stati analizzati dal programma di simulazione del trigger di secondo livello, CTrig, ed, in particolare, dall'implementazione in PixTrig dell'algoritmo di b -tagging descritto nel capitolo 5.2. Dal confronto dei risultati ottenuti nei due casi sono, infine, state tratte le conclusioni presentate nel paragrafo 6.2.

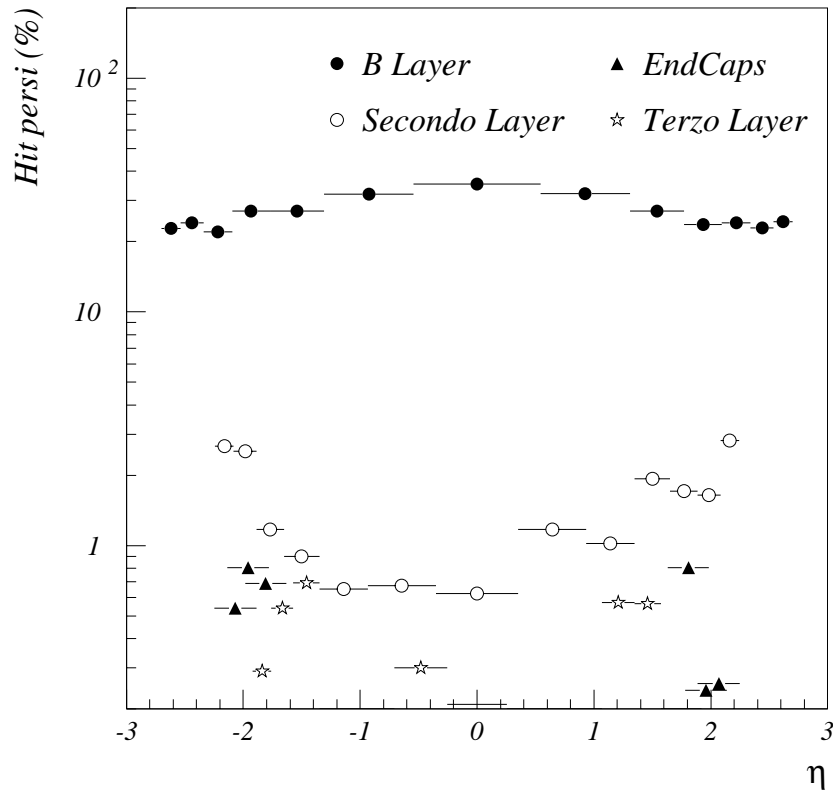


Figura 6.3: Percentuale di hit persi in ciascuna parte del rivelatore, per occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$.

Risultati preliminari

Prima di passare ad analizzare il contenuto fisico dei file prodotti tramite la simulazione in SimPix della catena di acquisizione dati, è stata valutata la percentuale di hit non ricostruiti dai Module Controller Chip nei tre casi studiati. In particolare, è stata misurata la quantità di dati persi dai moduli interessati da hit di b -jet o u -jet appartenenti al campione utilizzato.

In figura 6.1, 6.2 e 6.3 sono riportate le percentuali di hit persi, nelle singole parti del rivelatore, nelle tre differenti condizioni di irraggiamento studiate; nel primo caso è visibile unicamente la distribuzione per il b -layer, in quanto non si sono verificate perdite di dati nelle altre parti del rivelatore.

In figura 6.4 è mostrato, esclusivamente per il caso con maggiore occupanza, il confronto tra la percentuale di dati persi nel b -layer calcolata su tutti gli hit analizzati, già mostrata in figura 6.3, e quella ottenuta conteggiando

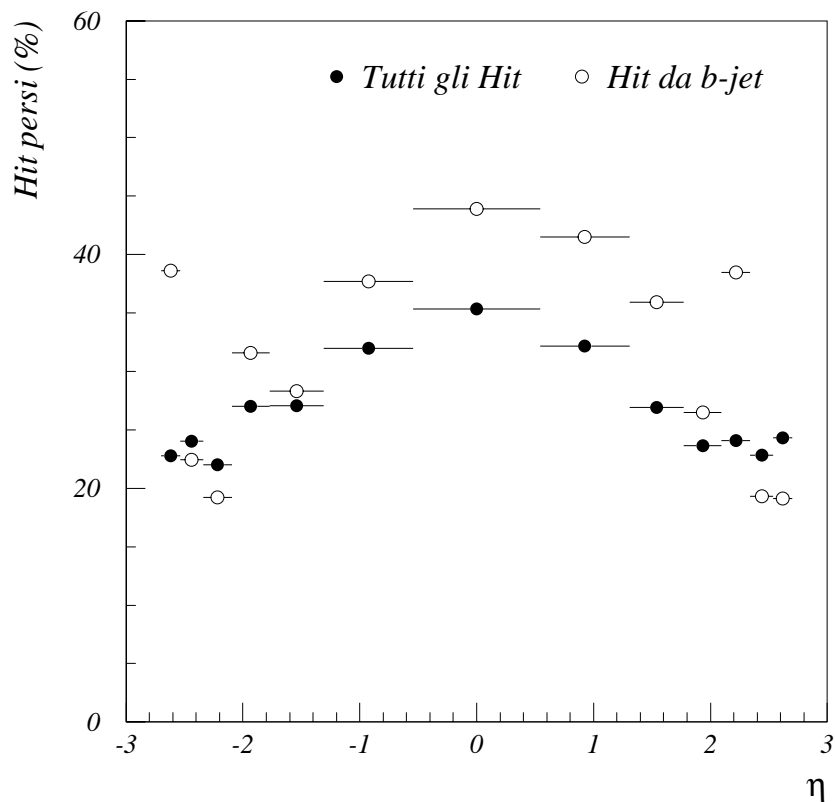


Figura 6.4: Confronto tra la percentuale di hit persi complessivamente nel b -layer e quella ottenuta conteggiando unicamente gli hit dei b -jet. Per questi ultimi, si può notare un lieve eccesso, maggiormente evidente al centro del b -layer.

do unicamente gli hit prodotti da b -jet. Da tale raffronto appare evidente un piccolo, ma significativo, eccesso nel caso degli hit associati a tracce di interesse fisico. Questo significa che esiste una debole correlazione tra le inefficienze della catena di acquisizione ed il contenuto fisico dei dati perduti.

Tale effetto è riconducibile alla ridotta dimensione tipica dei jet analizzati, che risulta decisamente inferiore alla superficie delle matrici di pixel collegate a ciascun front-end. Ciò comporta che, nel caso una di queste ultime venga colpita da un jet, il front-end ad esso collegato si trova nella condizione di dover gestire un numero di hit superiore alla media, aumentando, così, la probabilità di perdere dati.

6.2 Risultati

6.2.1 Ricostruzione di singola traccia

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuti dallo studio sull'algoritmo di ricostruzione di traccia, svolto analizzando l'intero campione di b -jet e u -jet.

Innanzitutto è stato studiato l'andamento dell'efficienza per le tracce presenti nel campione, e della percentuale di tracce false (fake) ricostruite, in funzione della quantità di fondo sovrapposta ai jet.

Per quel che riguarda le prestazioni dell'algoritmo prima della simulazione delle inefficienze introdotte dalla catena di acquisizione, si può osservare, passando da figura 6.5 a figura 6.6 e 6.7, che l'efficienza di ricostruzione di traccia subisce una diminuzione impercettibile all'aumentare del numero di eventi di fondo; al contrario, è evidente una crescita del numero di tracce ricostruite scorrettamente.

L'aumento delle tracce false è sostanzialmente dovuto a due fattori concomitanti. Innanzitutto, le tracce contenute negli eventi di fondo possono essere ricostruite correttamente, ma, anche in tal caso, non essendo riconosciute come appartenenti ai jet del campione, contribuiscono ad aumentare il numero di tracce definite false. Inoltre, al crescere della quantità di hit complessivamente presenti sul rivelatore, si ha un sensibile aumento del numero di combinazioni analizzate dall'algoritmo di ricostruzione che è di natura combinatoria. Ciò aumenta inevitabilmente la probabilità che terne di hit non appartenenti alla stessa traccia, vengano erroneamente ritenute tali perché fortuitamente allineate.

Il fatto che le perdite in efficienza risultino pressoché impercettibili è indice della robustezza dell'algoritmo utilizzato, rispetto ad aumenti del numero di combinazioni analizzate. Anche nelle condizioni di maggiore occupanza risulta, infatti, trascurabile la probabilità che un hit prodotto da un jet venga erroneamente associato ad una traccia falsa, non potendo più essere associato a quella a cui appartiene realmente.

La prima conclusione è quindi che, all'aumentare del fondo, pur crescendo il numero di tracce false, non diminuisce la capacità dell'algoritmo di ricostruire correttamente quelle associate ai jet.

Lo studio effettuato sull'impatto delle perdite di dati nella fase di acquisizione, simulata tramite SimPix, ha evidenziato inefficienze decisamente più marcate. Ancora nelle figure 6.5, 6.6 e 6.7 sono mostrate le conseguenze delle inefficienze del processo di lettura dati, nelle tre condizioni di irraggiamento simulate. Come si può notare, gli effetti diventano sempre più evidenti all'aumentare della quantità di fondo introdotta, e ciò è conseguenza della frazione sempre maggiore di hit persi, soprattutto nel b -layer. Si può infatti osservare che la perdita di efficienza corrisponde, in tutti i casi analizzati, alla percentuale di hit persi nel b -layer. Siccome per identificare una traccia

sono indispensabili tre punti, perdere un hit su uno dei tre piani del rivelatore significa, infatti, perdere completamente la possibilità di ricostruire correttamente la traccia a cui esso apparteneva, aumentando, al contrario, la probabilità di individuare tracce false. Infine, il fatto che il calo di efficienza osservato segua, in particolare, l'andamento dell'inefficienza riscontrata per gli hit prodotti da b -jet, riportata in figura 6.4 per le condizioni di maggiore occupanza, conferma l'ipotesi di una correlazione, seppur debole, tra le inefficienze dell'acquisizione dati ed il contenuto fisico degli hit persi.

Si può dunque concludere che l'impatto delle inefficienze della catena di acquisizione consiste in una progressiva riduzione del numero di tracce ricostruibili dall' algoritmo, che tuttavia conserva le sue caratteristiche intrinseche, limitatamente al campione di tracce per cui sono disponibili almeno tre punti. Ciò è dimostrato nelle figure 6.8 e 6.9, che mostrano la risoluzione in parametro di impatto e l'efficienza di ricostruzione prima e dopo la simulazione dell'acquisizione normalizzata alle sole tracce ricostruibili nei due diversi casi.

Si deve osservare infine che la concentrazione di particelle all'interno dei jets fa sì che un'inefficienza di lettura di un chip provoca la perdita di una frazione significativa delle tracce in esso contenuto. Ciò è mostrato in figura 6.10, dove è riportata la frazione di tracce dei b -jets perse evento per evento; come si nota, o non si perde nulla o si perde una frazione significativa dell'informazione fisica (in media il 50%, con una distribuzione quasi piatta).

6.2.2 b -tagging

In questo paragrafo sono riassunti i risultati ottenuti negli studi sull'efficienza dell'algoritmo di selezione di jet contenenti quark b .

Come si può notare in figura 6.11, non vi sono evidenti perdite di efficienza, a parità di fattore di reiezione sugli u -jet, all'aumentare del numero di eventi di fondo prima della simulazione dell'acquisizione. Questo risultato è, innanzitutto, una conseguenza della robustezza dimostrata dal meccanismo di ricostruzione delle singole tracce rispetto ad aumenti degli hit di fondo.

Un'altra conclusione che se ne può trarre è che, anche nel caso un aumento del numero di tracce false aggiunte a quelle dei b -jet tenda ad alterare la distribuzione dei parametri di traccia per gli eventi $HW(100)$, l'algoritmo di selezione riesce ugualmente a discriminare questi ultimi in base alle tracce aventi parametro d'impatto non nullo correttamente ricostruite.

Dalle figure 6.12, 6.13 e 6.14 risulta, invece, evidente il calo di prestazioni prodotto dalle inefficienze della catena di acquisizione dati. Questo fatto è una conseguenza della riduzione del numero di tracce ricostruibili esposto al paragrafo precedente, che rende meno significativo l'eccesso di parametro di impatto nei prodotti di decadimento del b e quindi rende più difficoltoso il b -tagging.

Tuttavia, anche nel caso in cui il numero medio di hit per modulo sia cir-

ca due volte superiore a quello previsto in condizioni nominali, l'algoritmo di b -tagging mantiene un'efficienza accettabile. Ciò indica che, sebbene il numero di tracce correttamente ricostruite diminuisca all'aumentare del fondo e delle inefficienze prodotte dai chip di lettura, l'algoritmo di selezione risulta comunque in grado di identificare i b -jet, basandosi solamente sui parametri di una parte delle tracce in essi originariamente contenute.

6.3 Conclusioni

Lo scopo dell'analisi presentata in questo capitolo era valutare l'influsso, sullo studio di canali fisici di rilevanza scientifica, di eventuali inefficienze del meccanismo di lettura degli hit e, in particolare, del Module Controller Chip.

Dai risultati ottenuti è apparso evidente come il peso di queste ultime si rifletta, in condizioni di irraggiamento superiori a quelle attese nominalmente, soprattutto sull'algoritmo di ricostruzione di traccia, la cui inefficienza risulta proporzionale alla frazione di hit persi dalla catena di acquisizione. È pure risultato evidente come le inefficienze dell'acquisizione siano più grandi nei moduli che contengono informazione fisica, come ovvia conseguenza della loro occupanza maggiore della media. Questa correlazione tra segnale fisico ed inefficienza è particolarmente pericolosa, ma fortunatamente si manifesta solo in condizioni estreme di utilizzo del rivelatore e solo in configurazioni significativamente più deboli di quelle che stiamo attualmente progettando. Infine, come prevedibile, la maggior parte di dati viene perduta nel piano più interno del rivelatore, a causa della sua maggiore occupanza. Da un lato questo è un fatto positivo, in quanto il sistema di tracciamento di ATLAS è largamente ridondante, e può facilmente far fronte, in sede di analisi "off-line" dei dati, alle inefficienze di un singolo piano (lo stesso, come detto, non è vero per gli algoritmi "on-line" del trigger di secondo livello). D'altro canto il layer più interno del rivelatore a pixel è quello che porta il maggior contributo alla risoluzione sul parametro di impatto; perdere efficienza in quella porzione del rivelatore significa quindi ridurre le prestazioni di b -tagging anche dal punto di vista dell'"off-line".

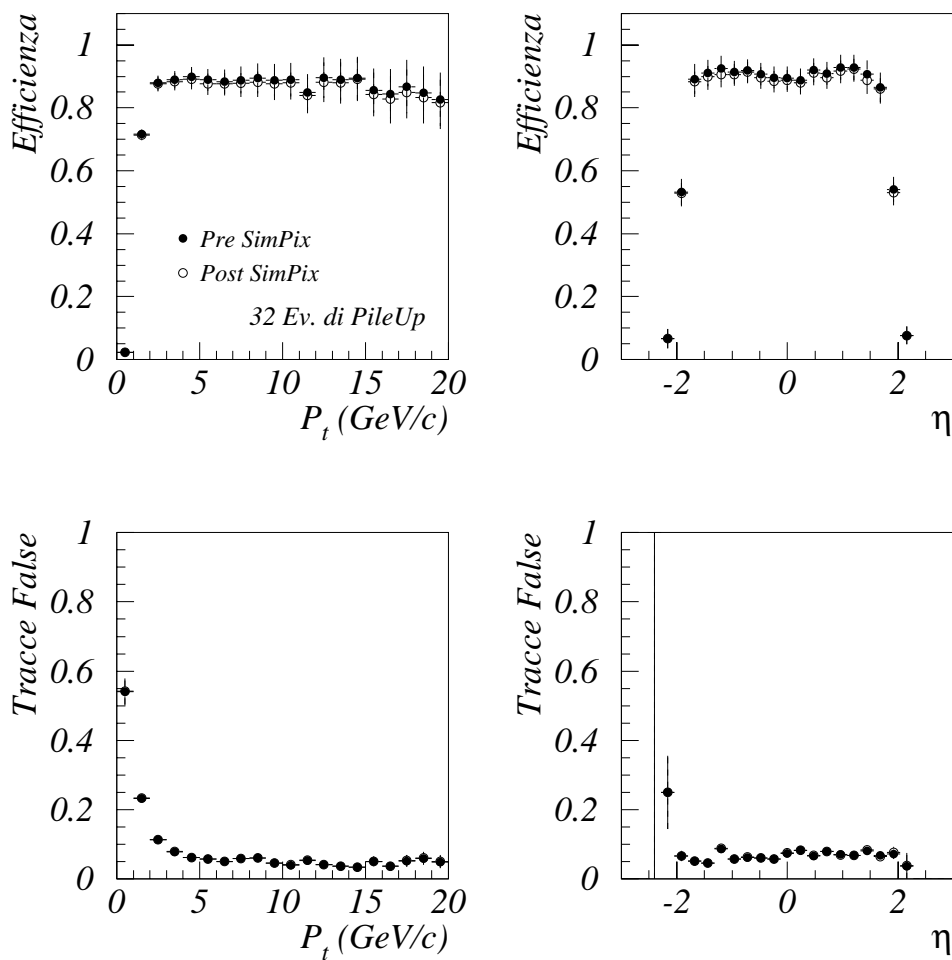


Figura 6.5: Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$. Sono riportate, in funzione di η e dell'impulso trasverso (p_T), l'efficienza per le tracce prodotte da jet e la percentuale di tracce false ricostruite. I punti pieni si riferiscono alle prestazioni prima della simulazione della catena di acquisizione, e quindi riflettono le caratteristiche intrinseche dell'algoritmo. I punti vuoti si riferiscono alla simulazione post-acquisizione.

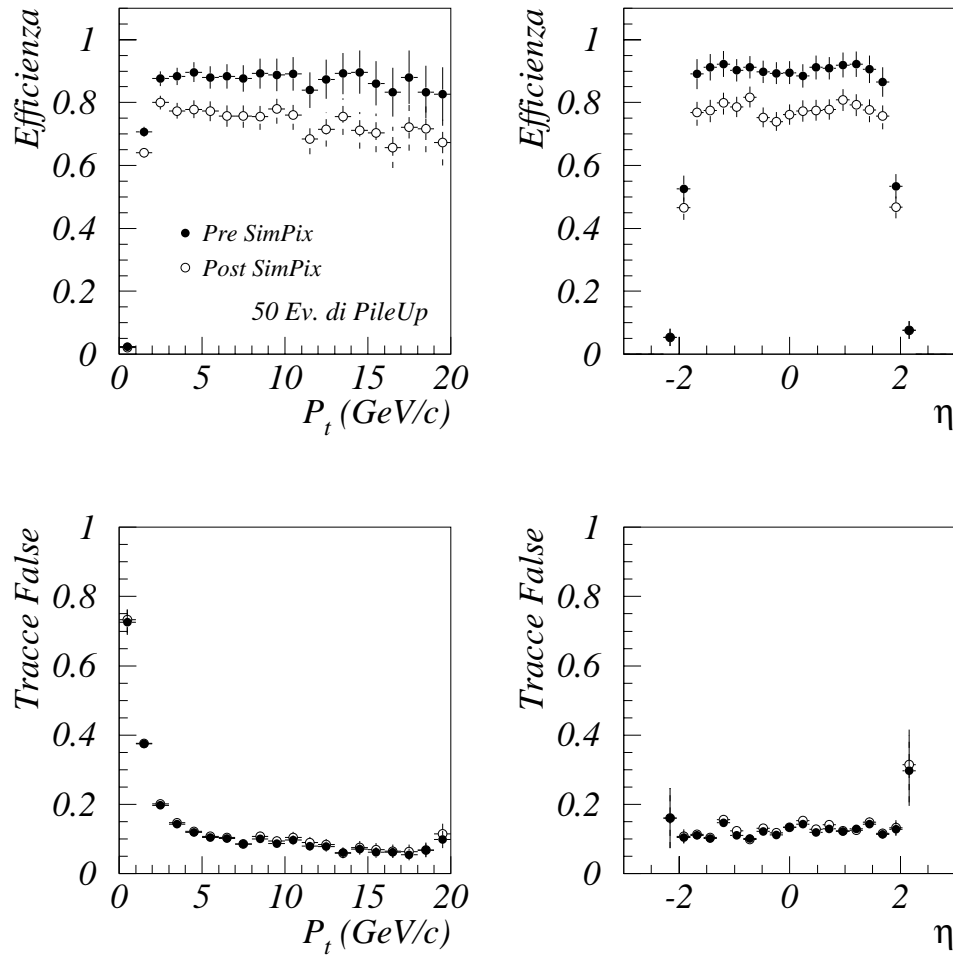


Figura 6.6: Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$. Sono riportate, in funzione di η e dell'impulso trasverso (p_T), l'efficienza per le tracce prodotte da jet e la percentuale di tracce false ricostruite. I punti pieni si riferiscono alle prestazioni prima della simulazione della catena di acquisizione; i punti vuoti si riferiscono alla simulazione post-acquisizione.

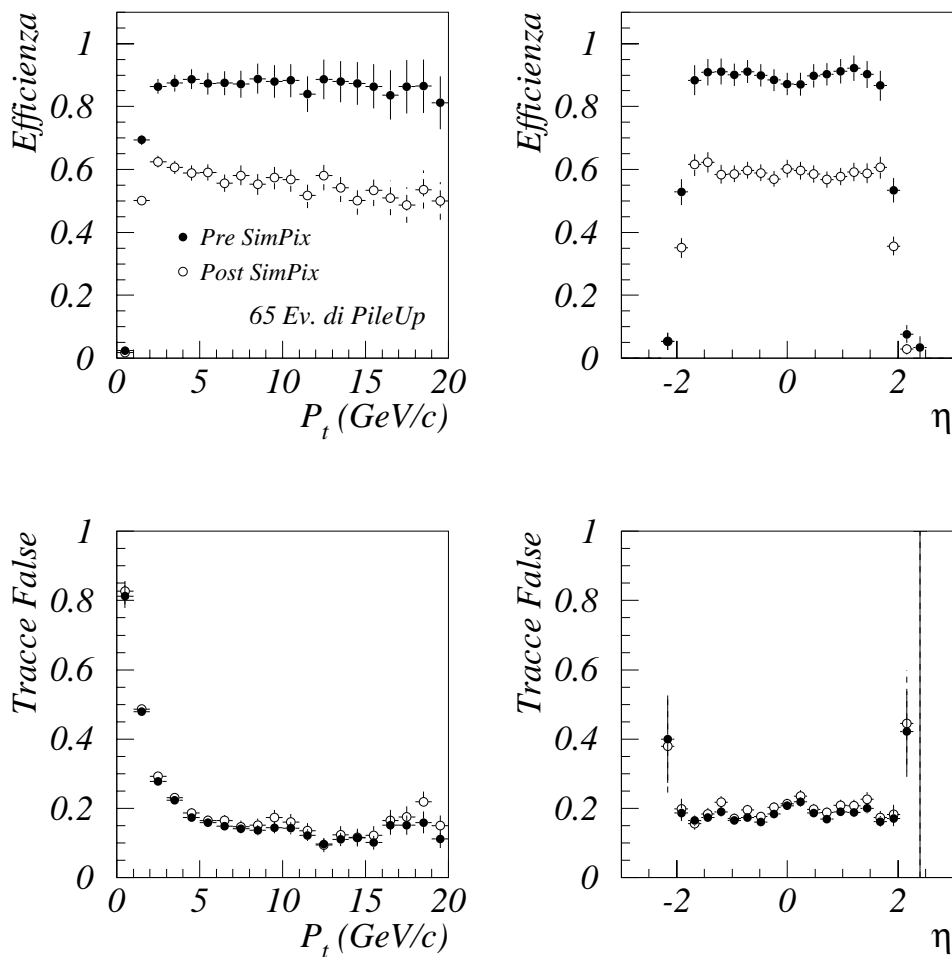


Figura 6.7: Risultati per l'algoritmo di ricostruzione delle tracce nel caso di occupanza dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$. Sono riportate, in funzione di η e dell'impulso trasverso (p_T), l'efficienza per le tracce prodotte da jet e la percentuale di tracce false ricostruite. I punti pieni si riferiscono alle prestazioni prima della simulazione della catena di acquisizione; i punti vuoti si riferiscono alla simulazione post-acquisizione.

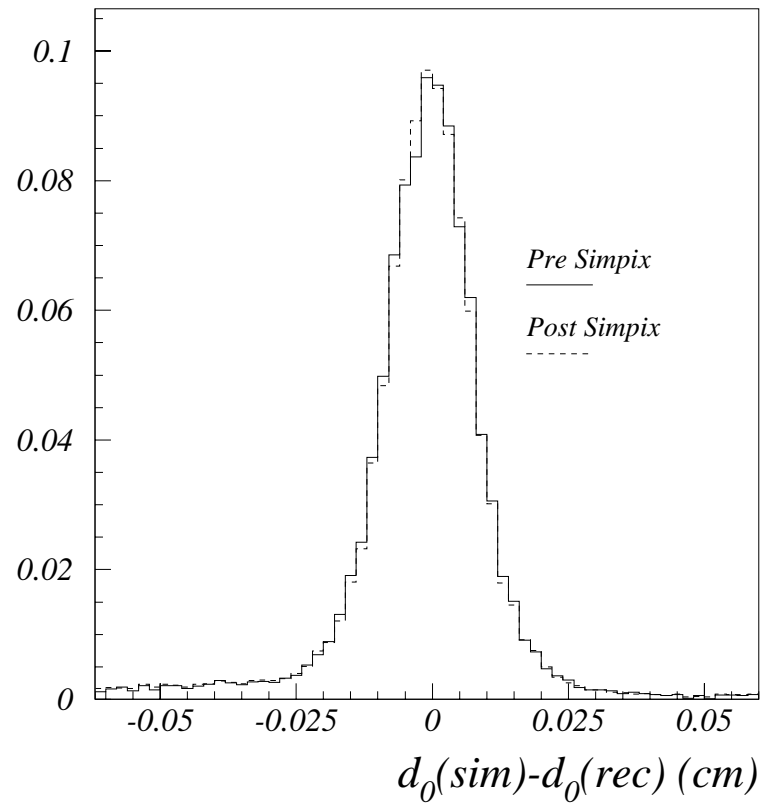


Figura 6.8: Risoluzione sul parametro di impatto prima e dopo la simulazione della catena di acquisizione.

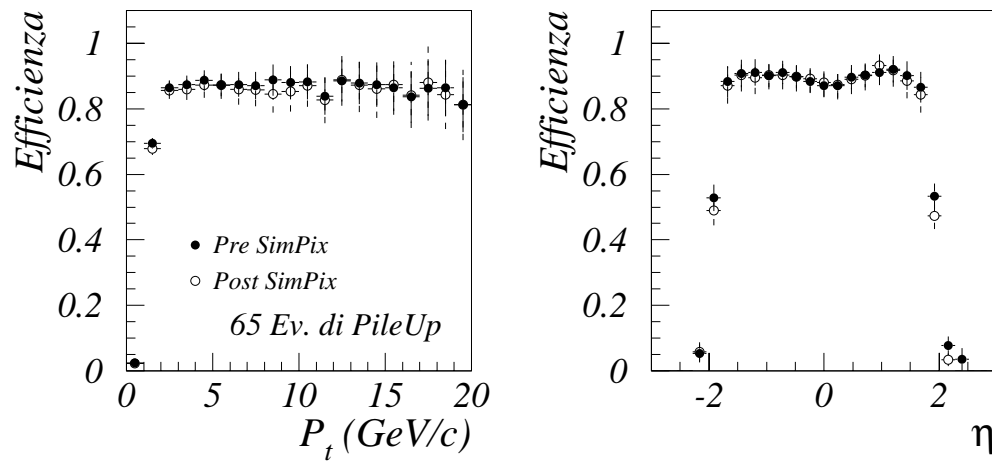


Figura 6.9: Efficienza intrinseca dell'algoritmo di ricostruzione di traccia prima e dopo la simulazione della catena di acquisizione.

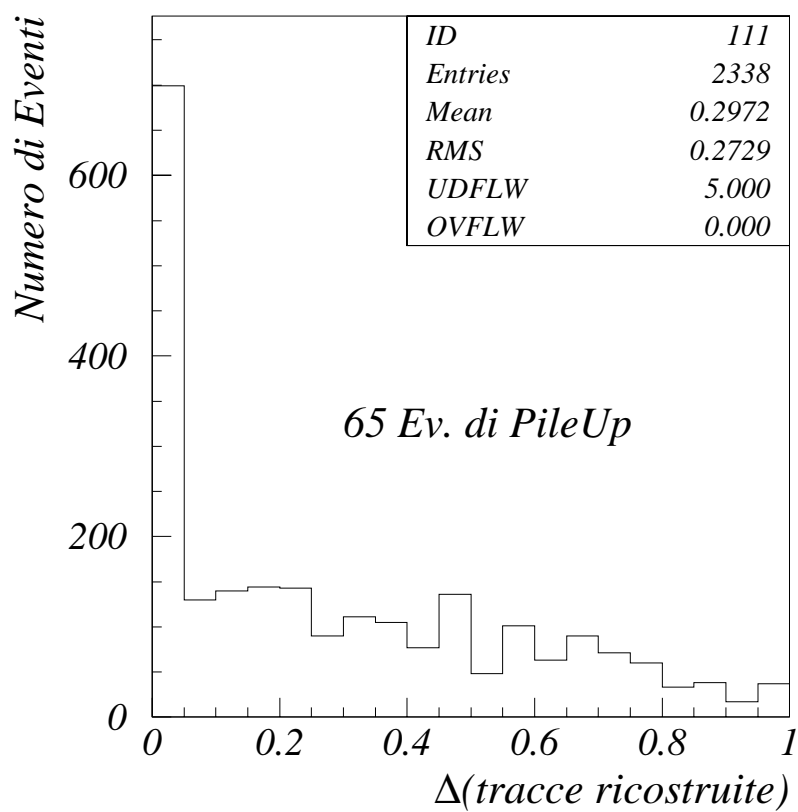


Figura 6.10: Frazione di tracce da b perse per effetto delle inefficienze della catena di acquisizione per occupanza del “b-layer” pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$.

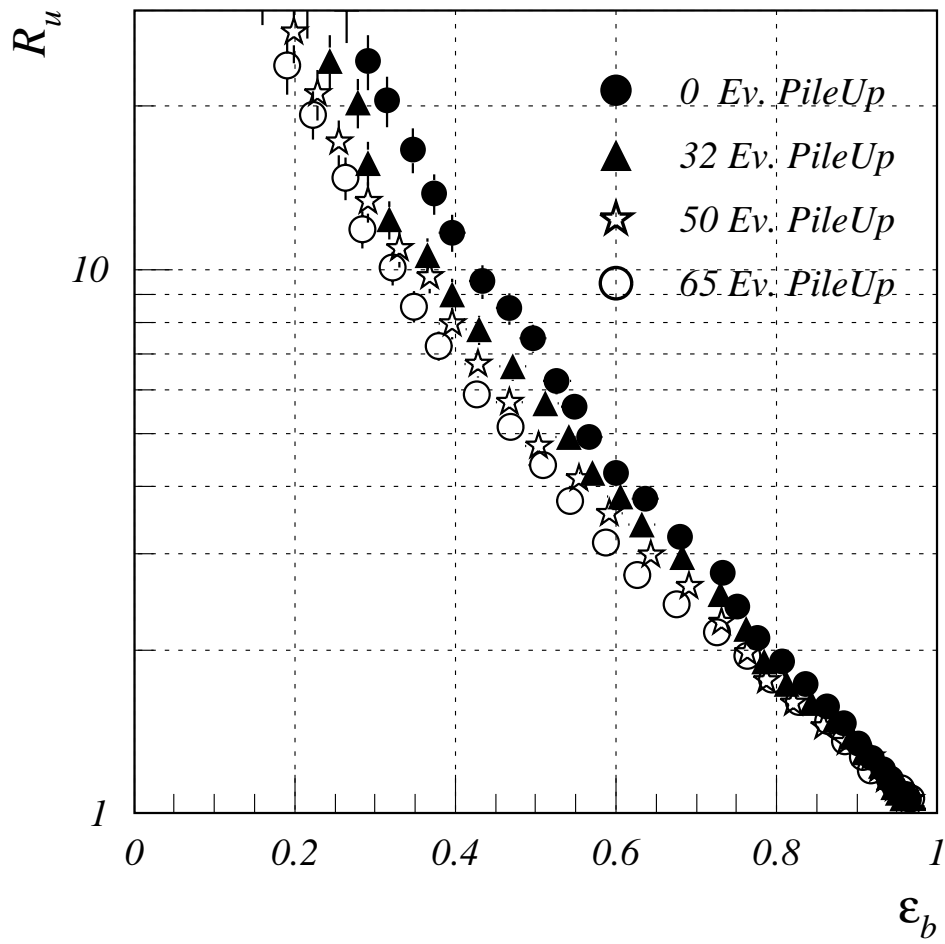


Figura 6.11: Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging al variare della quantità di fondo introdotta. Oltre ai tre casi discussi nel testo, è presentato il risultato ottenuto in assenza di processi di fondo.

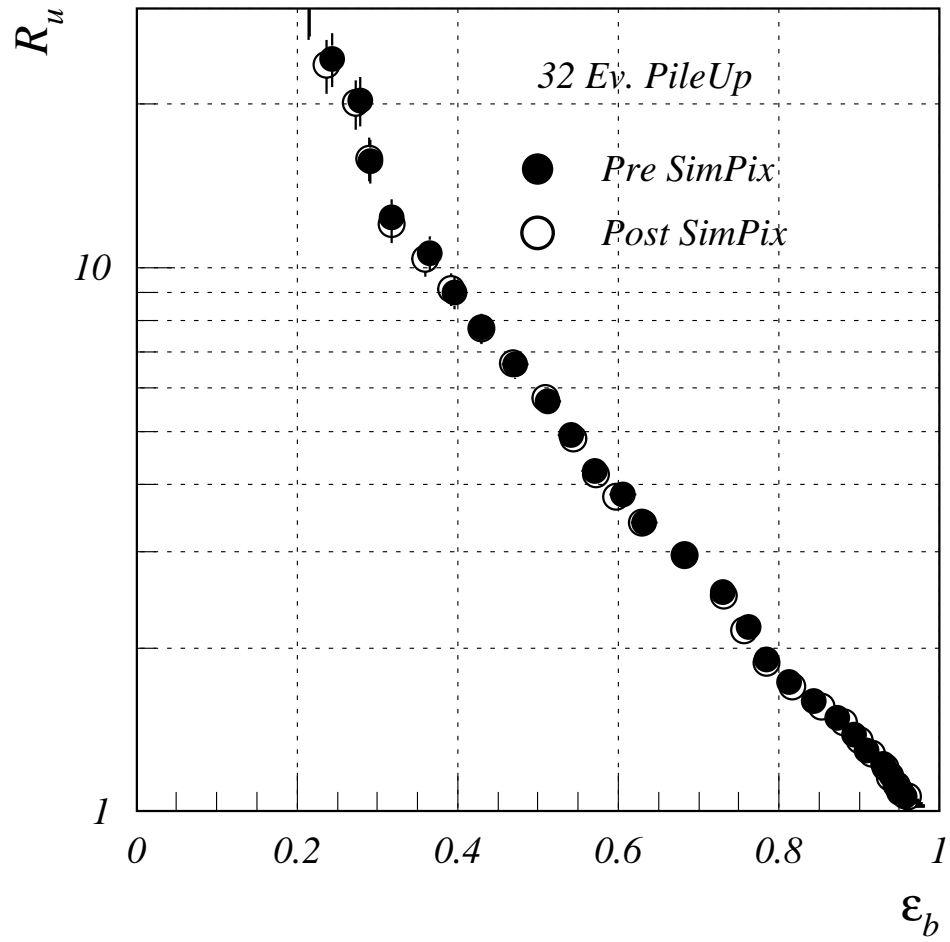


Figura 6.12: Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupazione dell'anello centrale del b -layer pari a $3.9 \cdot 10^{-4}$.

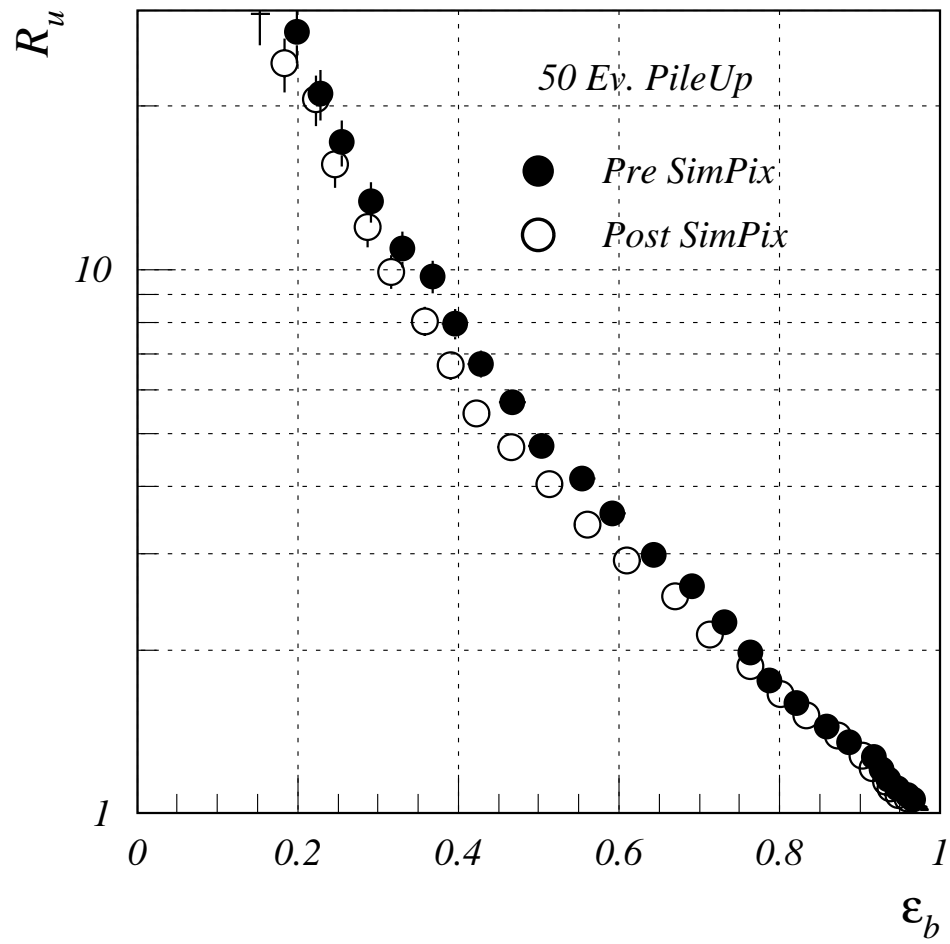


Figura 6.13: Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupazione dell'anello centrale del b -layer pari a $6.0 \cdot 10^{-4}$.

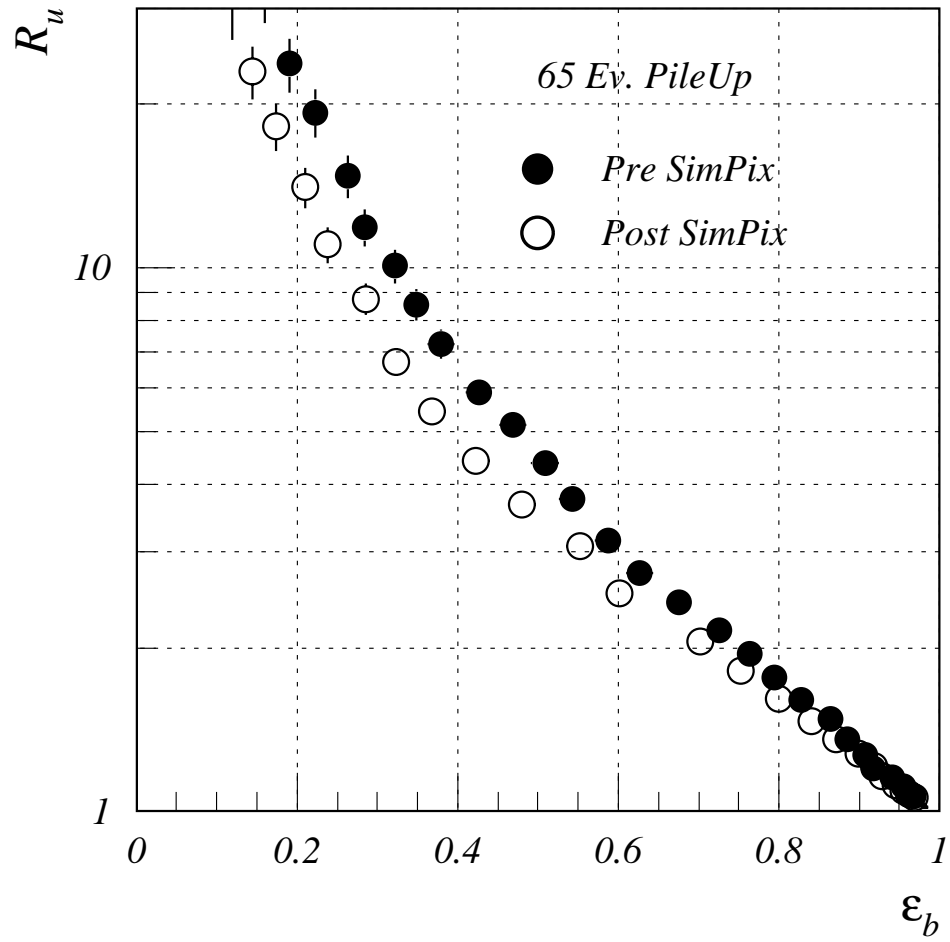


Figura 6.14: Risultati ottenuti per l'algoritmo di b -tagging, prima e dopo analisi e ricostruzione in SimPix, per un'occupazione dell'anello centrale del b -layer pari a $7.8 \cdot 10^{-4}$.

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di caratterizzare il comportamento della catena di acquisizione dati del rivelatore a pixel di ATLAS. Questa, a causa dell'elevata luminosità di LHC, si troverà a dover far fronte a condizioni di lavoro particolarmente critiche. Lo studio si è concentrato, con maggiore dettaglio, sul funzionamento del Module Controller Chip, il circuito elettronico dedicato al controllo ed alla gestione del flusso di dati dai sensori verso l'esterno del rivelatore.

Nella prima parte delle analisi effettuate, descritta nel capitolo 4, è stato mostrato come la soluzione attualmente in fase di sviluppo per l'implementazione reale dell'MCC, risulti pienamente sufficiente a garantirne la completa efficienza in condizioni nominali di utilizzo. Inoltre, il processo di acquisizione dati si è rivelato, grazie a tale soluzione, sufficientemente robusto da sopportare forti variazioni nel carico di lavoro del rivelatore. Infine, la configurazione del chip indicata come ottimale si è dimostrata in grado di mantenere la piena efficienza, anche nel caso in cui eventuali future modifiche apportate alla geometria del detector dovessero provocarne un aumento dell'occupanza.

Nella seconda parte del lavoro, esposta nel capitolo 6, è stato analizzato il caso in cui si verificano perdite di dati durante il trasferimento dal rivelatore verso l'esterno, per valutarne l'impatto sullo studio di canali fisici di interesse scientifico. Tali condizioni potrebbero verificarsi nel caso non risultasse possibile implementare le soluzioni indicate come ottimali nel capitolo 4, oppure se la quantità di fondo prodotta nelle collisioni risultasse superiore a quella prevista, o, infine, nel caso di diffusi malfunzionamenti del rivelatore. Le analisi presentate sono state svolte simulando il comportamento di una configurazione dell'MCC sottodimensionata rispetto a quella considerata ottimale, sottoposta a condizioni di occupanza superiori a quelle previste. Per valutare l'impatto fisico delle inefficienze prodotte in tali circostanze, è stato studiato l'andamento dell'efficienza di un algoritmo di selezione "on-line" di jet contenenti quark b .

Da tale analisi è risultata una debole, ma significativa correlazione tra le inefficienze del processo di acquisizione ed il contenuto fisico dei dati perduti. Si è, infatti, osservato come la percentuale di hit persi risulti lievemente superiore nel caso venga calcolata conteggiando unicamente gli hit associati

a jet, piuttosto che il totale dei dati analizzati.

Infine, è stato evidenziato il fatto che le perdite più gravi si verificano, immancabilmente, sul piano più interno del rivelatore, maggiormente esposto alle tracce delle particelle prodotte nelle collisioni. Questo ha mostrato una diretta conseguenza sull'efficienza dell'algoritmo di ricostruzione di traccia utilizzato, per il quale il calo di efficienza è risultato pari alla percentuale di perdita sugli hit associati a jet. L'algoritmo di *b*-tagging ha mostrato, invece, una maggiore robustezza rispetto alle inefficienze dell'elettronica, dovuta al fatto che è sufficiente un numero limitato di tracce provenienti da un jet, per identificare la natura di quest'ultimo.

Il fatto che la maggioranza delle perdite di dati sia concentrata nel layer più interno del rivelatore, ha, in generale, implicazioni rilevanti sugli algoritmi di ricostruzione di traccia e *b*-tagging. Ciò impedisce, infatti, di ottenere algoritmi "on-line" veloci e pienamente efficienti. Questi, per essere in grado di ricostruire tutte le tracce, anche nel caso vengano persi molti hit sul primo layer, dovrebbero estendere la propria analisi fino a comprendere punti spaziali prodotti da rivelatori più esterni, quali il SemiConductor Tracker, con conseguente aumento dei tempi di elaborazione. Tale operazione può essere invece svolta senza problemi da algoritmi di analisi "off-line". Anche in tal caso, però, la perdita dei punti presenti sul *b*-layer, noti con maggior precisione degli altri, comporterebbe un notevole degrado della risoluzione sui parametri delle tracce ricostruite, ed in particolare sul parametro d'impatto, con conseguenti ricadute negative sugli algoritmi di selezione di *b*-jet. Sono di conseguenza giustificati tutti gli sforzi per realizzare la soluzione tecnica che garantisca piena efficienza.

Il lavoro cominciato con questa tesi va proseguito in tre diverse direzioni: devono essere sviluppati e provati nuovi algoritmi per l'MCC, con lo scopo di migliorare ulteriormente il margine di sicurezza del sistema di acquisizione; devono essere ripetute le simulazioni utilizzando un modello realistico anche per i chip di front-end, in quanto anch'essi possiedono buffer che possono essere riempiti e quindi dare luogo ad inefficienze di acquisizione; si devono infine studiare miglioramenti degli algoritmi "on-line" per il trigger di secondo livello atti a ridurre il drastico peggioramento delle prestazioni in caso di condizioni di lavoro particolarmente ostili.

Bibliografia

Capitolo 1:

LHC Collaboration, *The LHC Conceptual Design Report*, CERN/AC/95-05 (1995)

ATLAS Collaboration, *ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Volume I-II*, CERN/LHCC/99-14 (1999)

Capitolo 2:

L. Okun, *Leptoni e Quark*

P. Renton, *Electroweak Interactions*

ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations, *Search for Higgs Bosons: preliminary combined results using LEP data collected at energies up to 202 GeV*, CERN-EP/2000-055

ATLAS Collaboration, *ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Volume I-II*, CERN/LHCC/99-14 (1999)

Capitolo 3:

ATLAS Collaboration, *ATLAS Inner Detector Technical Design Report Volume I-II*, CERN/LHCC/97-16 (1997)

ATLAS Collaboration, *ATLAS Pixel Detector Technical Design Report*, CERN/LHCC/98-12 (1998)

MCC Design Group, *MCC-D2 Design Specifications*

Capitolo 5:

ATLAS HLT/DAQ/DCS Group, *ATLAS High-Level Triggers, DAQ and DCS Technical Proposal*, CERN/LHCC/2000-17

A. Baratella, M. Dameri, P. Morettini e F. Parodi, *PixTrig: a LVL2 track finding algorithm based on pixel detector*, ATLAS-DAQ-2000-10 (2000)

J. Baines et al., *B-Physics Event Selection for the ATLAS High Level Trigger*, ATL-DAQ-2000-031

A. Baratella, P. Morettini, F. Parodi, *b-tagging Event Selection for the ATLAS High Level Trigger*, ATL-COM-DAQ-2000-011 (2000)