



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Misura del rapporto di efficienza di identificazione del fotone tra dati e simulazione Monte Carlo per il Run2 dell'esperimento ATLAS ad LHC

Tesi di Laurea Triennale in Fisica
Federico Marletta

Relatore: Prof. Leonardo Carlo Carminati

Correlatori: Dott. Ruggero Turra, Dott. Laura Nasella

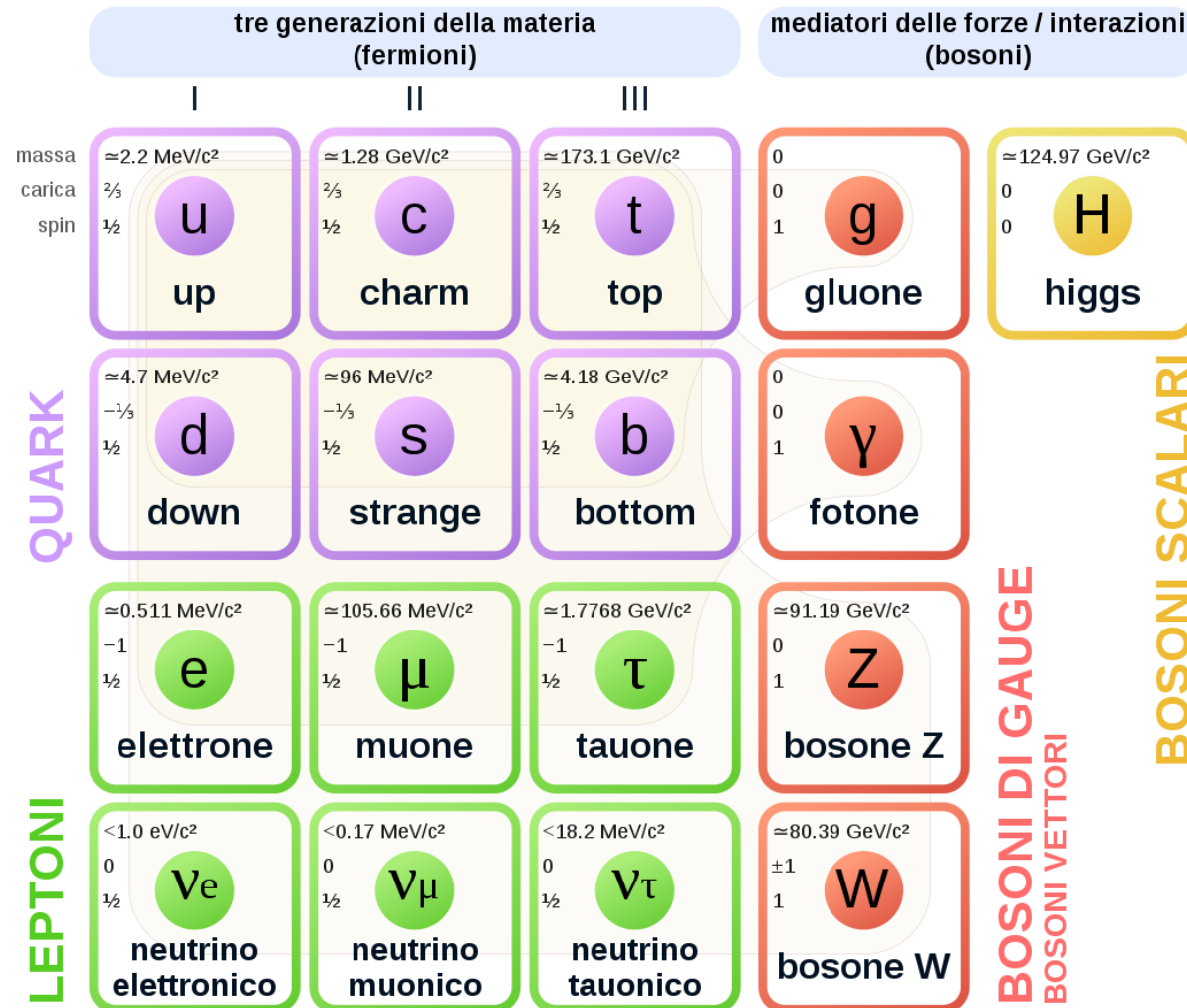
Anno accademico 2024/2025





Contesto Teorico

Modello Standard delle Particelle Elementari



Fermioni

- Costituiscono la materia
- Spin $\frac{1}{2}$
- Accompagnati dalla propria antiparticella
- Divisi in Leptoni e Quark in base alle interazioni a cui prendono parte

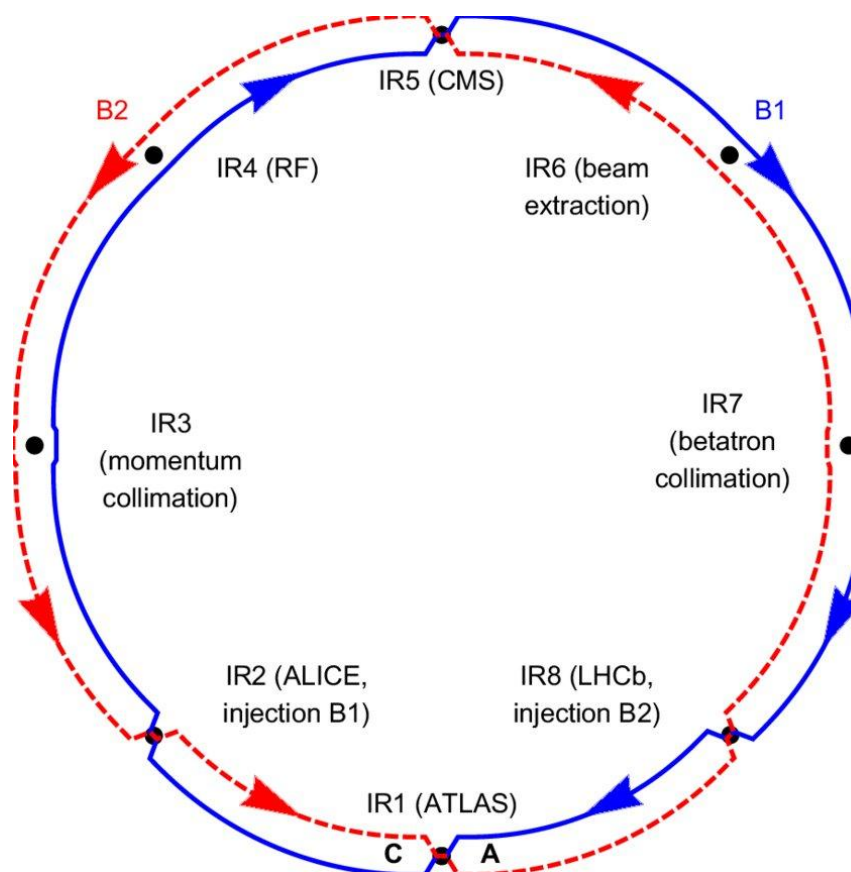
Bosoni

- g: mediatore dell'interazione forte
- γ : mediatore dell'interazione elettromagnetica
- W/Z: mediatori dell'interazione debole
- H: conferisce massa ai bosoni W/Z e ai fermioni



LHC

- Acceleratore del CERN
- Collisioni Protone-Protone a $\sqrt{s} = 13.6$ TeV ➡ Studio processi fisici descritti dallo SM e ricerche di nuova fisica





ATLAS

- Sistema di rivelatori:
 - Inner detector: momento e traiettoria delle particelle cariche
 - Calorimetri: energia di elettroni, fotoni e adroni
 - Muon Spectrometer: momento dei muoni

- Sistema di coordinate:

- Origine in corrispondenza di IP
- Il piano trasversale descritto dalle coordinate $r-\phi$



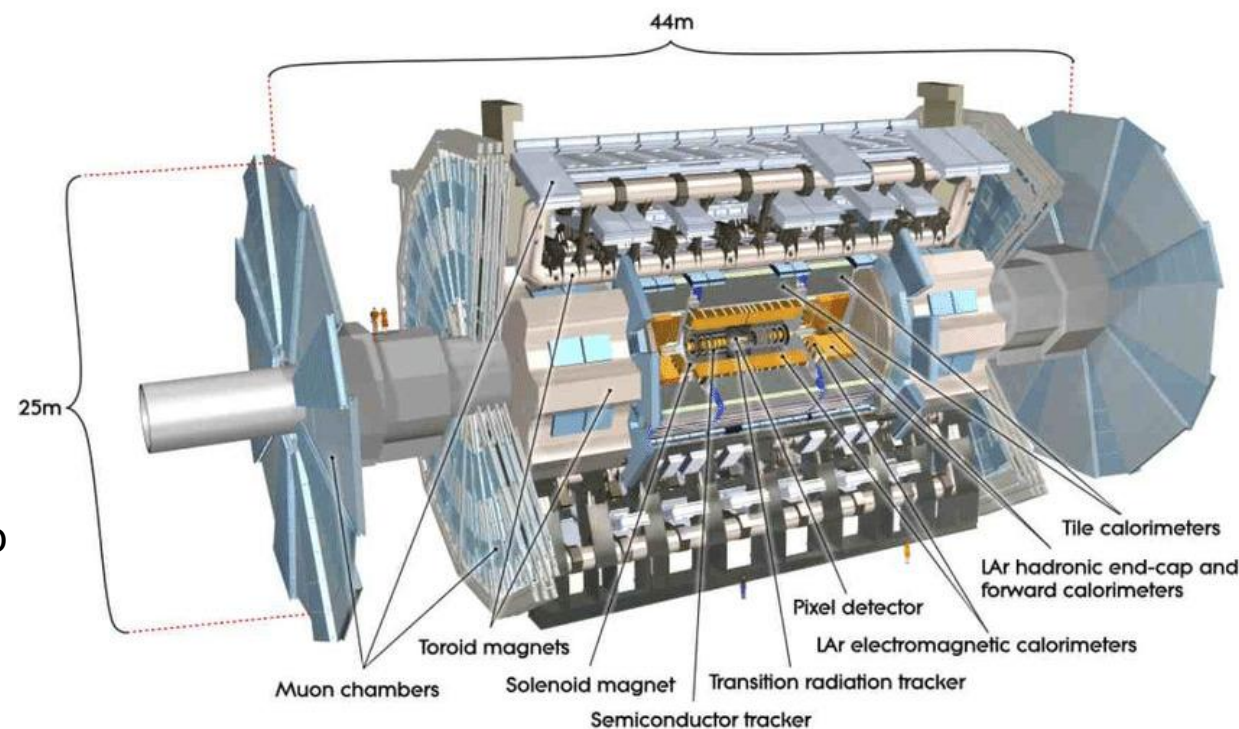
P_T è il momento trasverso su questo piano

- L'angolo θ è definito rispetto all'asse z .



Riportato in termini di pseudorapidità:

$$\eta = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$





ATLAS

- Sistema di rivelatori:
 - Inner detector: momento e traiettoria delle particelle cariche
 - Calorimetri: energia di elettroni, fotoni e adroni
 - Muon Spectrometer: momento dei muoni

- Sistema di coordinate:

- Origine in corrispondenza di IP
- Il piano trasversale descritto dalle coordinate r - ϕ



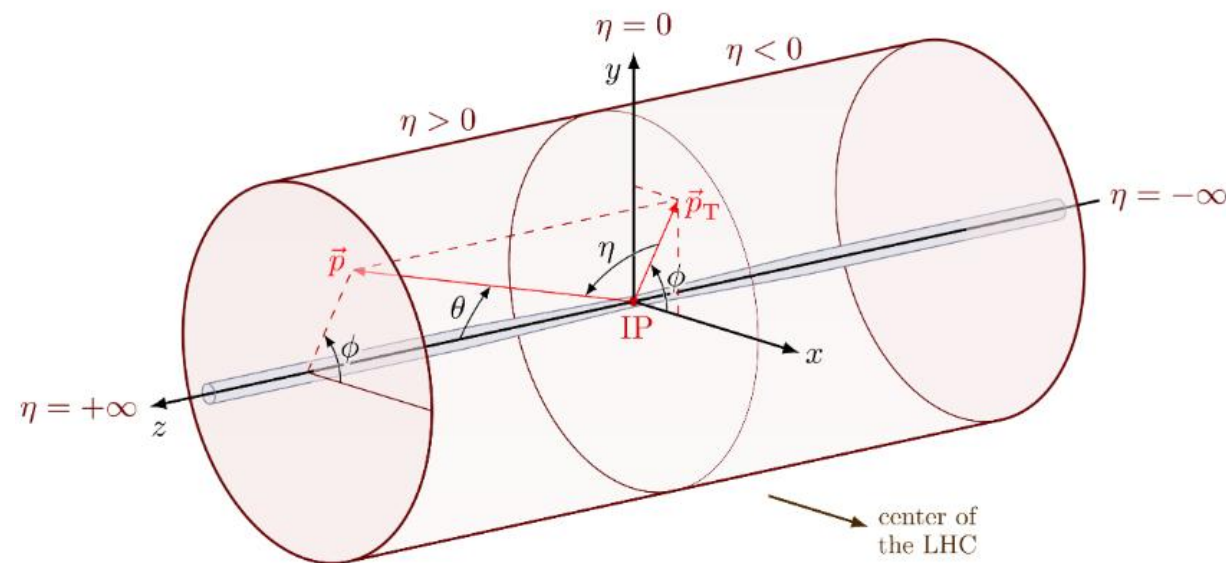
P_T è il momento trasverso su questo piano

- L'angolo θ è definito rispetto all'asse z .



Riportato in termini di pseudorapidità:

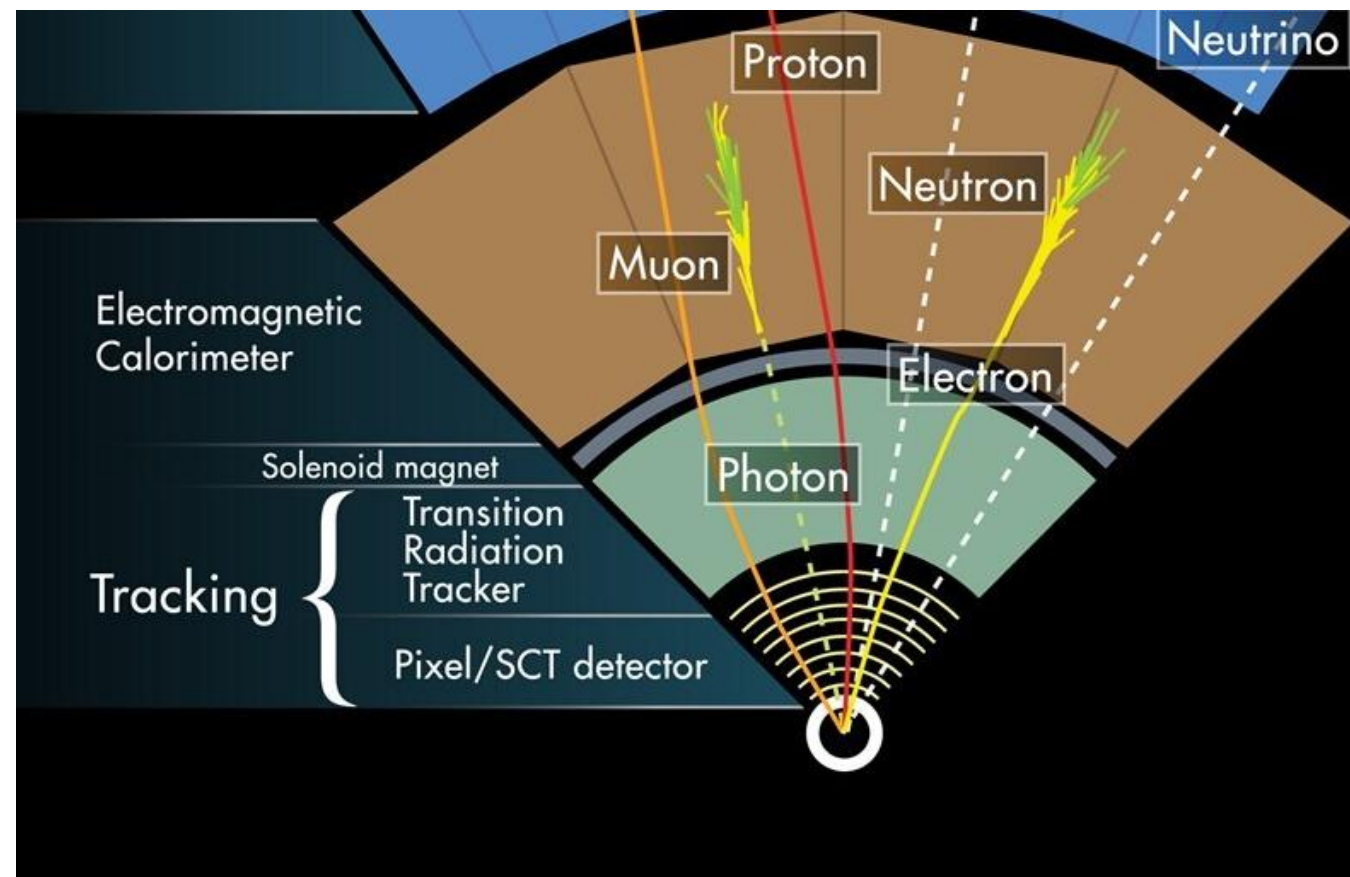
$$\eta = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$





Ricostruzione di Elettroni e Fotoni

- Ricostruzione di depositi energetici nelle celle dei calorimetri - cluster
- Ricostruzione delle tracce
- Abbinamento tracce o vertici di conversione con cluster di energia
- e^- :
 - definito come un oggetto costituito da un cluster con una traccia associata
- γ può essere di due tipi :
 - **Fotone convertito**: cluster associato ad un vertice di conversione
 - **Fotone non convertito**: cluster non associato né ad una traccia, né ad un vertice di conversione.





Identificazione e isolamento dei Fotoni

Per rigettare il contributo di jet adronici (e π^0) ricostruiti erroneamente come fotoni vengono applicati dei criteri di selezione:

- L'identificazione: valuta la compatibilità dello sciame misurato nel calorimetro con quello atteso per un fotone
- L'isolamento: misura quanta energia è depositata attorno al candidato fotone (i fotoni di segnale interessanti sono tipicamente isolati)

Categorie di selezione:

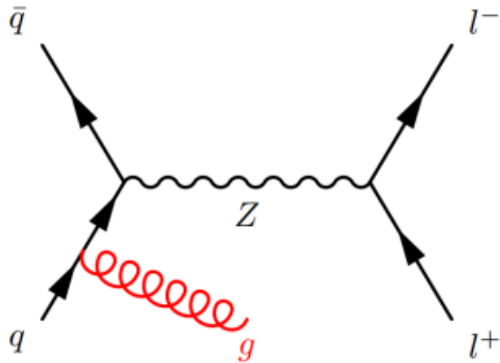
- Loose: selezione più permissiva; include più candidati ma con maggiore contributo di background.
- Tight: selezione più stringente; garantisce un'elevata purezza del campione.



Obiettivi:

1. Misurare dell'efficienza della selezione tight per l'identificazione del fotone: $\epsilon_{tight} = \frac{Y_{tight}}{Y_{tot}}$
2. Misura degli Scale Factors: $SF = \frac{\epsilon_{tight}^{data}}{\epsilon_{tight}^{MC}}$ ➡ Correzione per le simulazioni

Necessario un campione puro di fotoni: dati RUN2 relativi al decadimento: $Z \rightarrow l^+ l^- \gamma$:



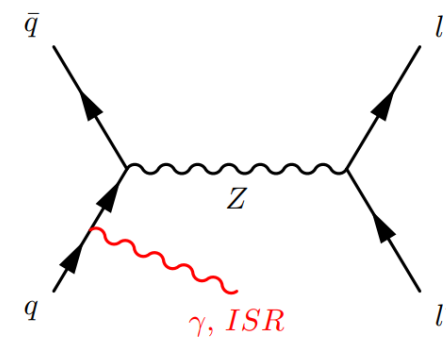
Eventi Z+jets

- Dati dei rivelatori
- Eventi di segnale simulato
- Eventi di background Z+jets simulato



Selezioni applicate ai dataset

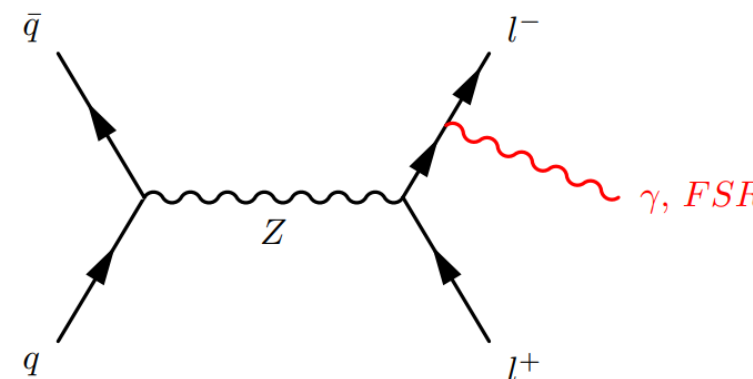
- $P_T^Y > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta_\gamma| \in [0, 1.37] \cup [1.52, 2.37]$
- $\text{ph.conflag} = 3$
- Signal Region
- $m_{ll} < 85 \text{ GeV}$
- $m_{ll\gamma} \in [50, 120] \text{ GeV}$



Caso ISR:

$$m_{ll} \approx m_Z \approx 91 \text{ GeV}$$

$$m_{ll\gamma} > m_Z$$



Caso FSR:

$$m_{ll} < m_Z \approx 91 \text{ GeV}$$

$$m_{ll\gamma} \approx m_Z$$

Presente meno
background



Selezioni applicate ai dataset

- $P_T^Y > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta_\gamma| \in [0, 1.37] \cup [1.52, 2.37]$
- $\text{ph.conflag} = 3$
- Signal Region
- $m_{ll} < 85 \text{ GeV}$
- $m_{ll\gamma} \in [50, 120] \text{ GeV}$

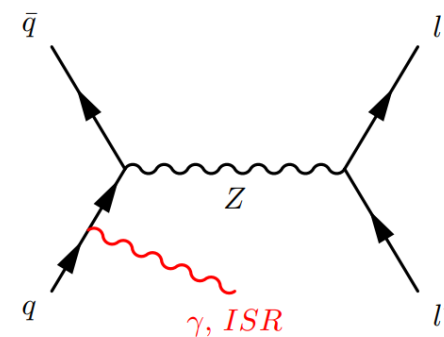


PROBLEMA:

Rimane comunque una frazione di background che bisogna rimuovere per avere un campione puro di fotoni



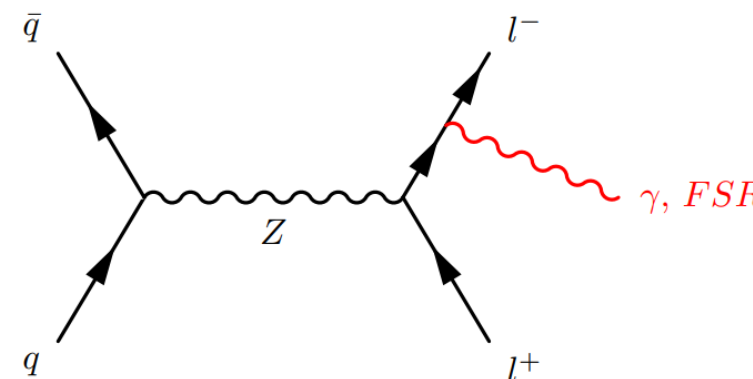
Fit simultaneo nella variabile $m_{ll\gamma}$



Caso ISR:

$$m_{ll} \approx m_Z \approx 91 \text{ GeV}$$

$$m_{ll\gamma} > m_Z$$



Caso FSR:

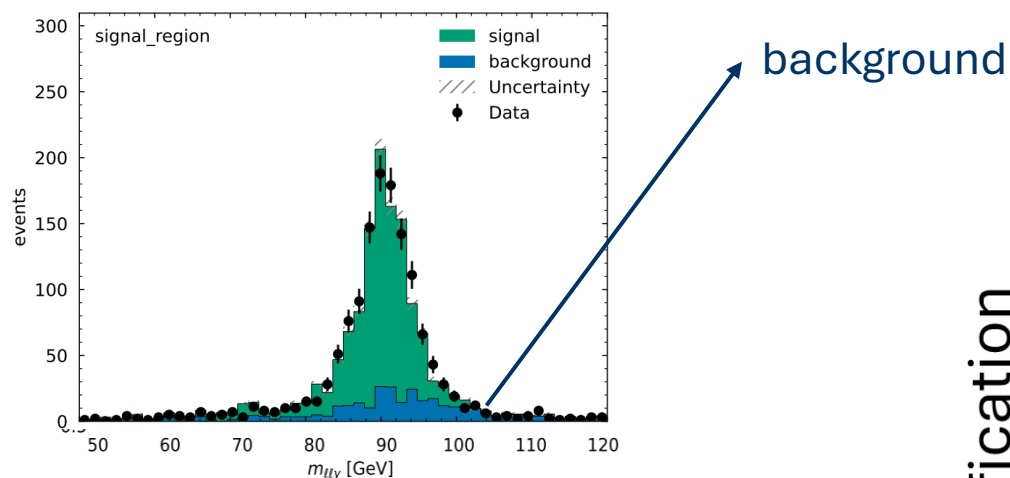
$$m_{ll} < m_Z \approx 91 \text{ GeV}$$

$$m_{ll\gamma} \approx m_Z$$

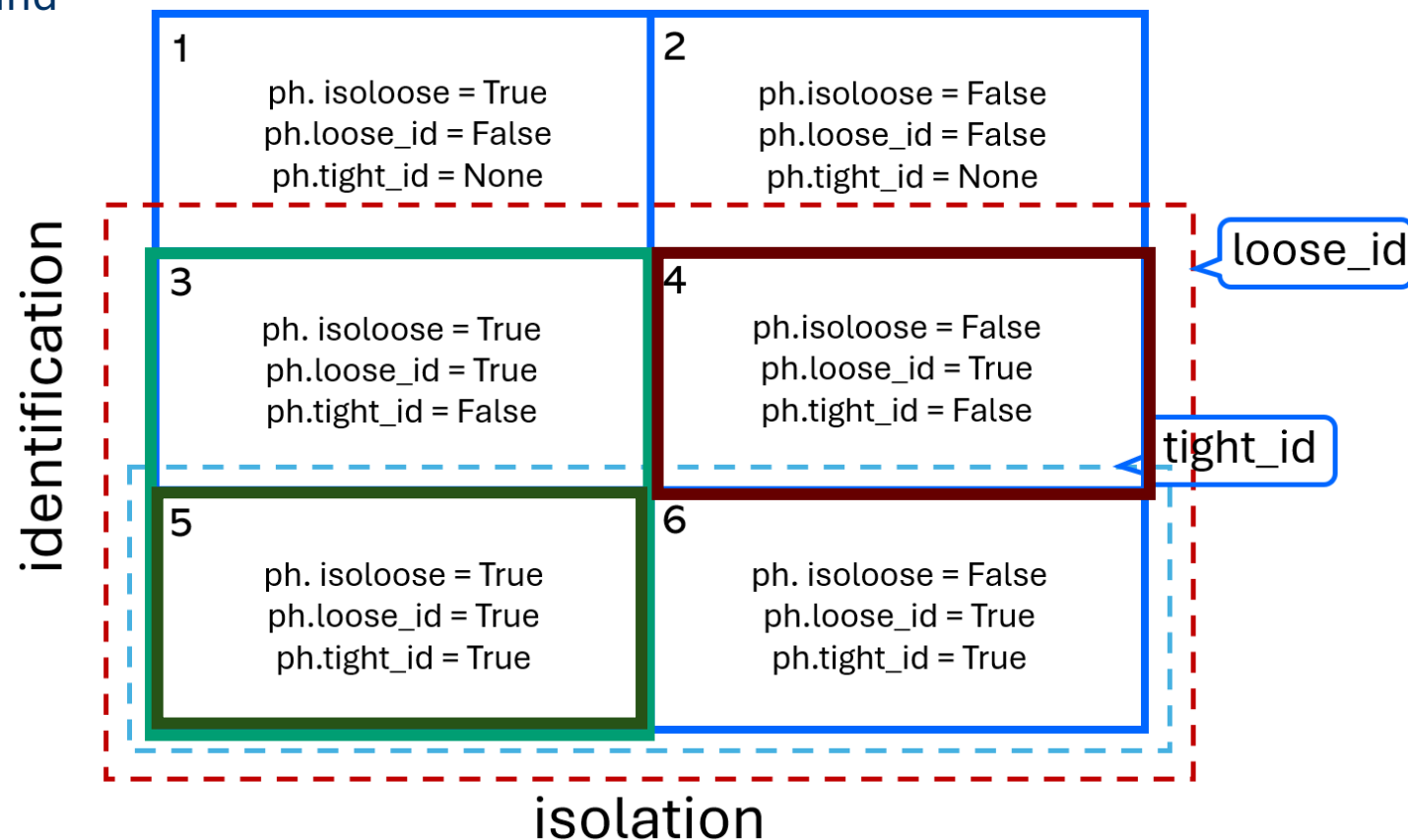
Presente meno background



Signal Region e Control Region



- Per misurare efficienza della selezione tight:
 - SR a numeratore: regione 5
 - SR a denominatore: regione 5+3
- Background dalla Control Region 4





Fit simultanei in SR e CR

Binning in η e P_T

$\eta = (0, 0.6), (0.6, 1.37), (1.52, 1.81), (1.81, 2.37)$

$P_T = (10, 15), (15, 20), (20, 25), (25, 30), (30, 35), (35, 40), (40, 50),$

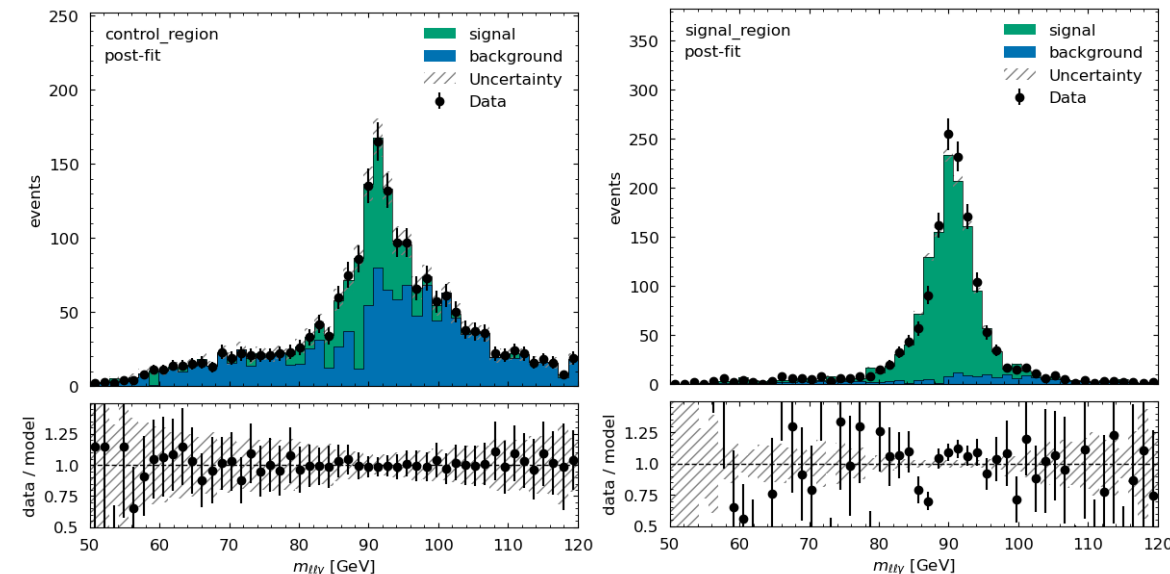
$(50, 70), (70, 150)$ GeV

Modello statistico SR:

$$N_{SR,i}^{model} = \mu_{SR} \cdot N_{sig,SR,i}^{MC} + \kappa_{bkg} \cdot \gamma_i \cdot N_{CR,i}^{data}$$

Modello statistico CR:

$$N_{CR,i}^{model} = \underbrace{\mu_{CR}}_{=1} \cdot N_{sig,CR,i}^{MC} + \gamma_i \cdot N_{CR,i}^{data}$$



POSTFIT			
Canale	Campione	Yield	Errore
CR	Background	1275.0542	± 43.0632
CR	Segnale	581.2748	± 24.1096
SR	Background	187.9898	± 23.3245
SR	Segnale	1269.1621	± 40.3163

$$\mu_{SR} = 1.1145 \pm 0.0354$$

$$\kappa_{bkg} = 0.1474 \pm 0.0186$$



Efficienza dei dati

- Calcolo Efficienza: $\epsilon_{tight,i}^{data} = \frac{Y_{tight,i}^{data}}{Y_{tot,i}^{data}}$
- Errore statistico: σ_{stat}^{data}

Errori sistematici:

1. $m_{ll\gamma} \in [50, 120]$ GeV



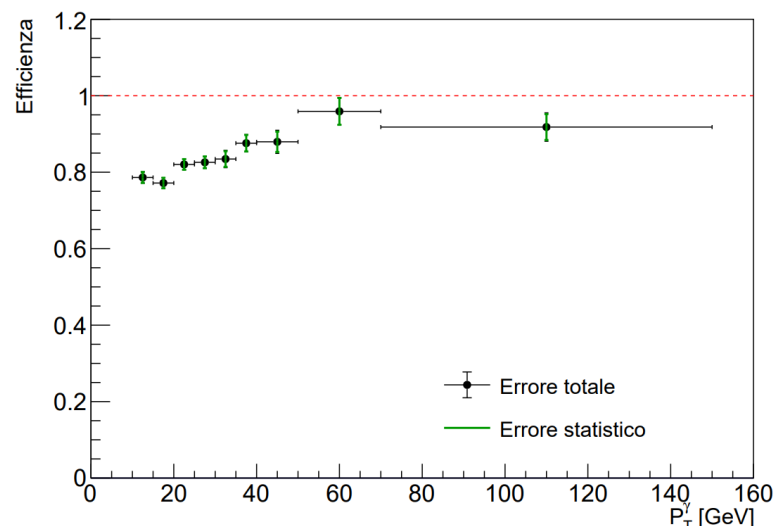
Scelta $m_{ll\gamma} \in [55, 115]$ GeV

2. Regione 4 come CR

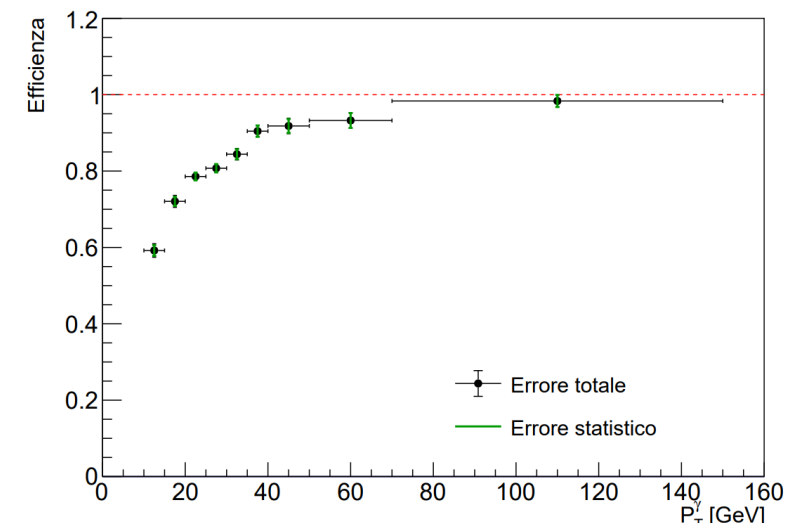


Scelta regione 2 come CR

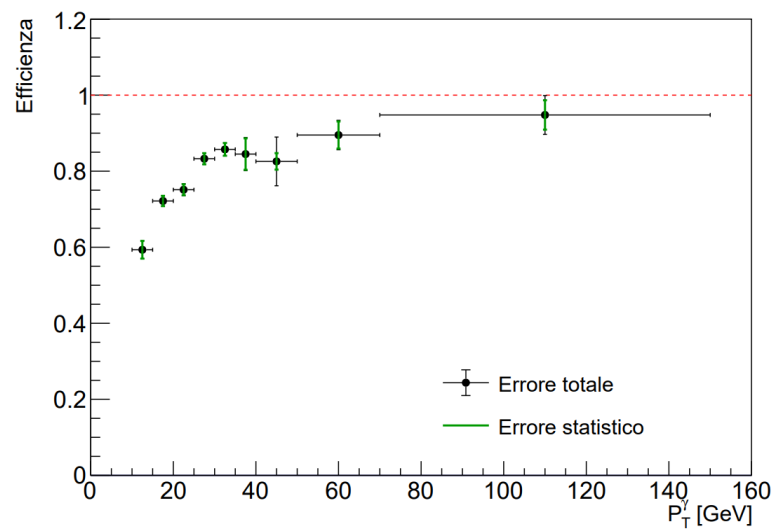
Efficienza dei dati dal fit per $\eta \in [0 - 0.6]$



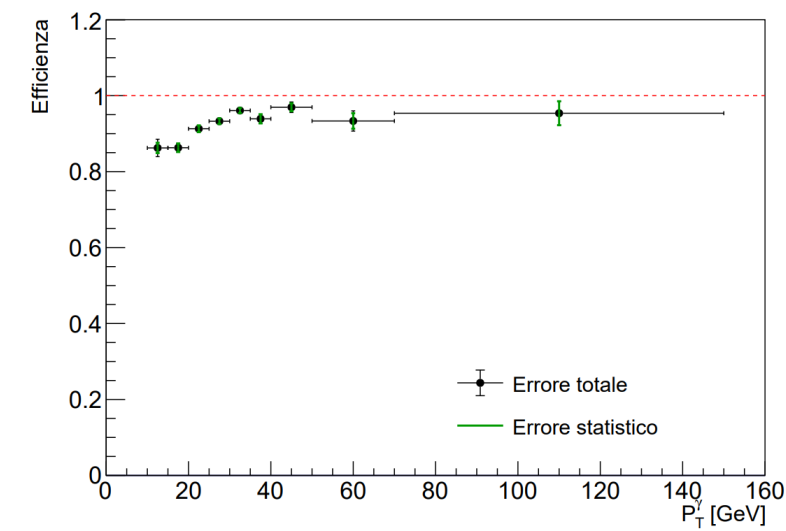
Efficienza dei dati dal fit per $\eta \in [0.6 - 1.37]$



Efficienza dei dati dal fit per $\eta \in [1.52 - 1.81]$



Efficienza dei dati dal fit per $\eta \in [1.81 - 2.37]$





Efficienza del Monte Carlo

Eventi di decadimento simulati con MC



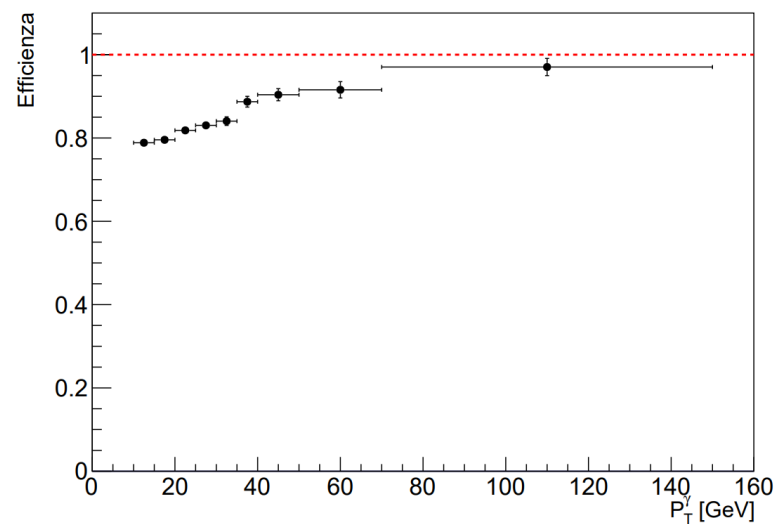
SR a numeratore: $Y_{tight,i}^{MC}$

SR a denominatore: $Y_{tot,i}^{MC}$

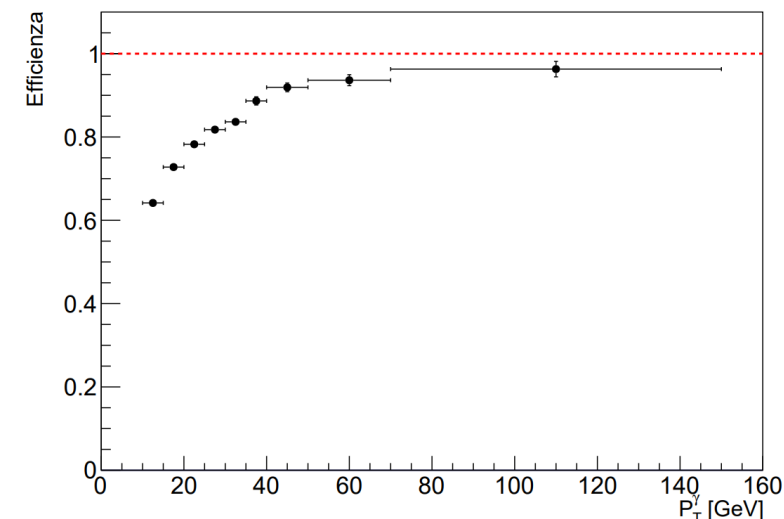
➔ $\epsilon_{tight,i}^{MC} = \frac{Y_{tight,i}^{MC}}{Y_{tot,i}^{MC}}$

➔ Errore statistico: $\sigma_{stat,i}^{MC}$

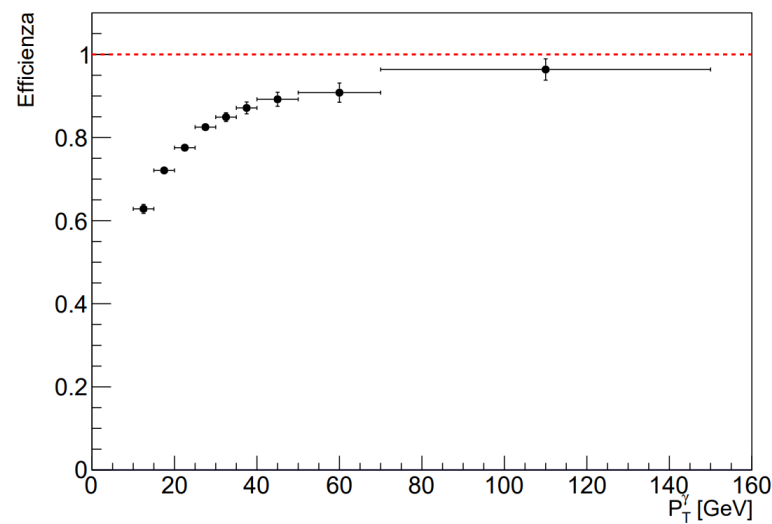
Efficienza di sgn MC per $\eta \in [0 - 0.6]$



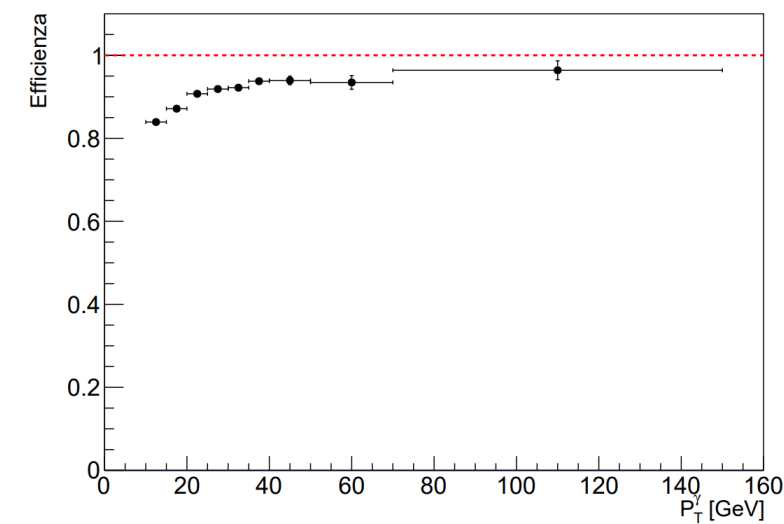
Efficienza di sgn MC per $\eta \in [0.6 - 1.37]$



Efficienza di sgn MC per $\eta \in [1.52 - 1.81]$



Efficienza di sgn MC per $\eta \in [1.81 - 2.37]$





Misura Scale Factors

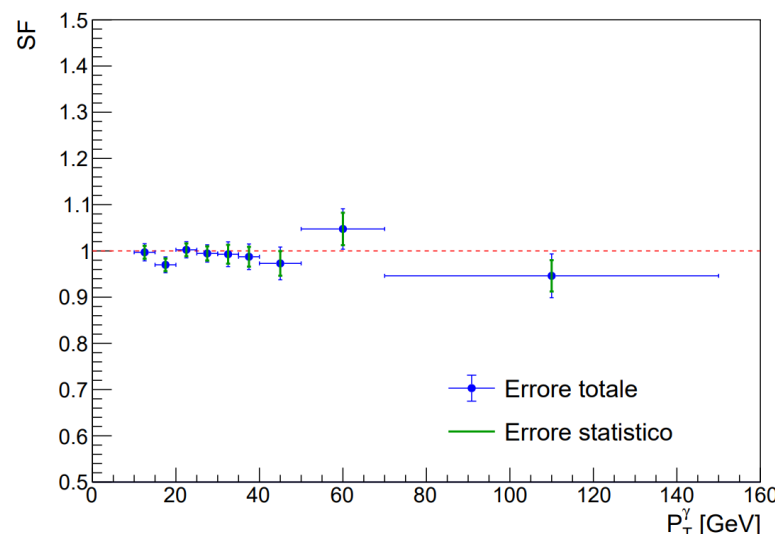
$$SF_i = \frac{\epsilon_{tight,i}^{data}}{\epsilon_{tight,i}^{MC}}$$

Errori su SF:

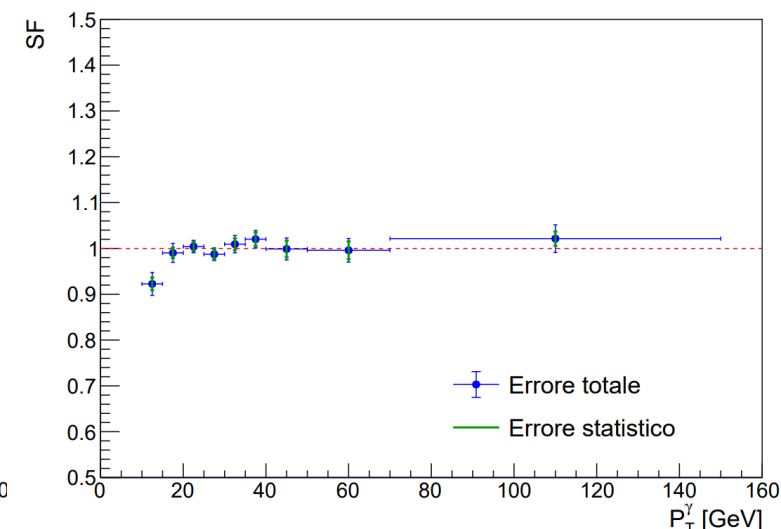
- Statistico su ϵ_{tight}^{data}
- Sistemático su ϵ_{tight}^{data}
- Statistico su ϵ_{tight}^{MC}

Sistemático su SF

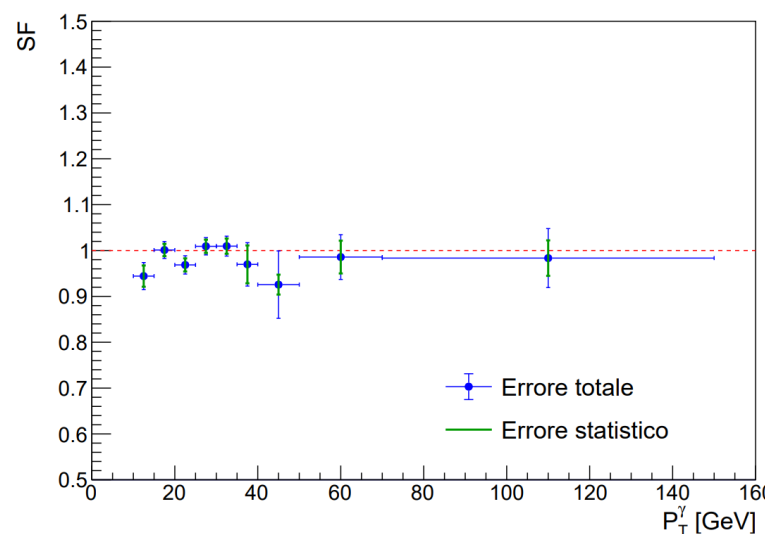
Scale Factor per $\eta \in [0 - 0.6]$



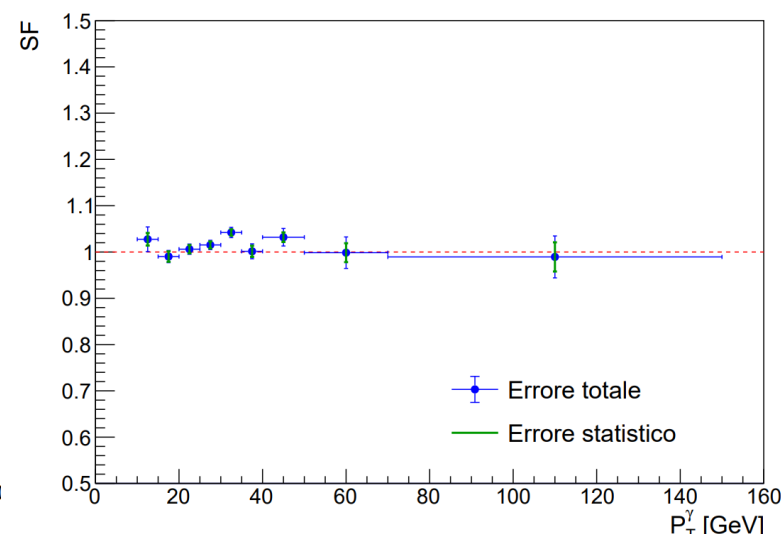
Scale Factor per $\eta \in [0.6 - 1.37]$



Scale Factor per $\eta \in [1.52 - 1.81]$



Scale Factor per $\eta \in [1.81 - 2.37]$





Conclusioni

- Misura dell'efficienza di identificazione della selezione tight nei dati relativi al decadimento: $Z \rightarrow l^+ l^- \gamma$,
- Misura di SF:
 - valori compatibili con 1 entro σ_{tot}^{SF}
 - σ_{tot}^{SF} varia da 0.66% - 7.75%
 - σ_{tot}^{SF} composto da:
 - Componente statistica: proveniente da σ_{stat}^{data} sull'efficienza, risulta dominante a basso P_T
 - Componente sistematica: proveniente da σ_{sist}^{data} e dallo σ_{stat}^{MC} , risulta dominante a alto P_T
 - Il contributo dominante all'errore sistematico è dovuto alla scelta della CR per la descrizione del background

Applicazioni:

- Analisi che coinvolgono fotoni nello stato finale
- Ricerca della verifica sperimentale di $HH \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$, previsto da MS

Grazie per l'attenzione

Backup Slides

INDICE

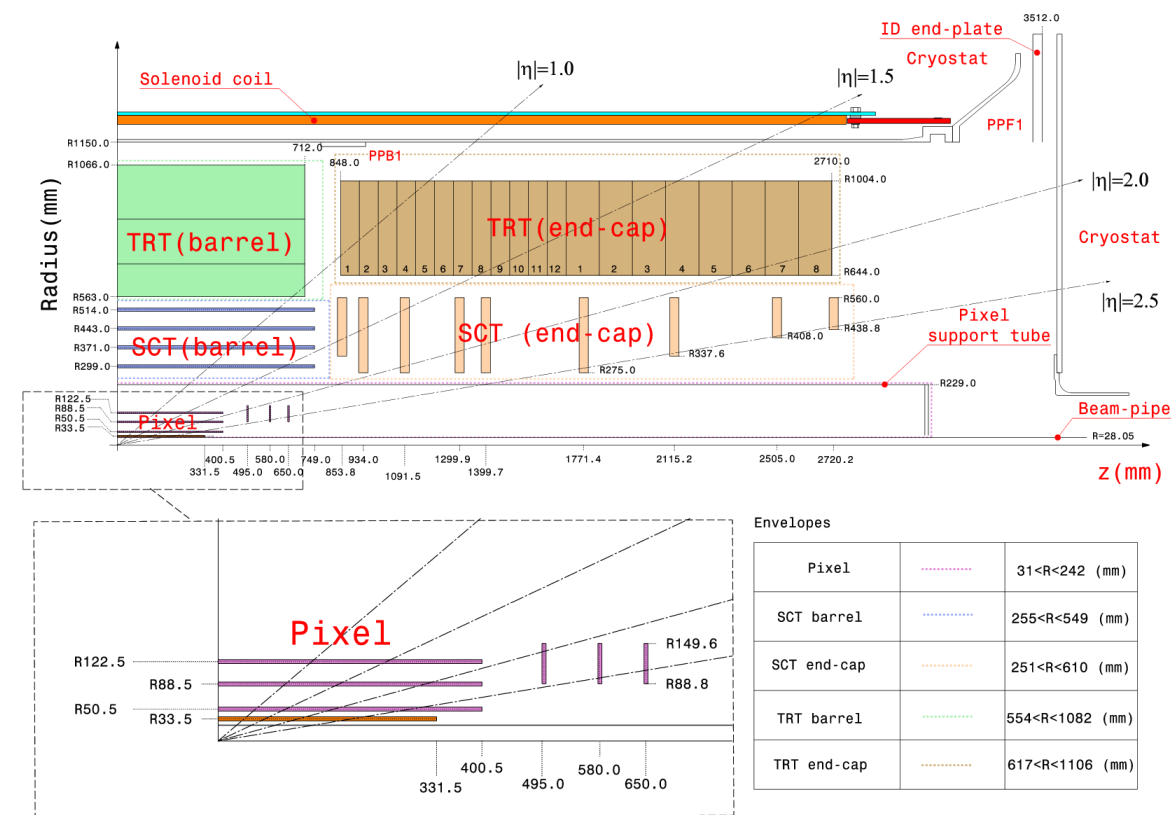
- 1) Il large Hadron Collider - LHC
- 2) Il rivelatore ATLAS
- 3) Ricostruzione di Elettroni e Fotoni con il rivelatore ATLAS
- 4) Algoritmi di classificazione con Machine Learning
- 5) Classificazione di Elettroni e Fotoni
- 6) Conclusioni





Inner Detector

- Pixel:
 - Quando una particella carica passa attraverso il silicio, ionizza gli atomi del materiale, creando coppie elettrone-lacuna. Questi segnali elettrici vengono raccolti dai pixel e convertiti in dati digitali che rappresentano il percorso della particella
- SCT
 - Simile al Pixel Detector, le particelle ionizzano il silicio creando coppie elettrone-lacuna. Le strisce di silicio, disposte perpendicolarmente tra loro, raccolgono questi segnali per tracciare il percorso della particella.
- TRT
 - Quando una particella carica passa attraverso i tubi, provoca ionizzazione del gas. I segnali elettrici generati vengono raccolti dai fili centrali nei tubi. Inoltre, le particelle relativistiche producono radiazione di transizione quando attraversano i materiali di rivestimento, che può essere rilevata per distinguere tra particelle leggere e pesanti.



Rappresentazione schematica del Layout del Tracciatore
Interno – Inner Detector

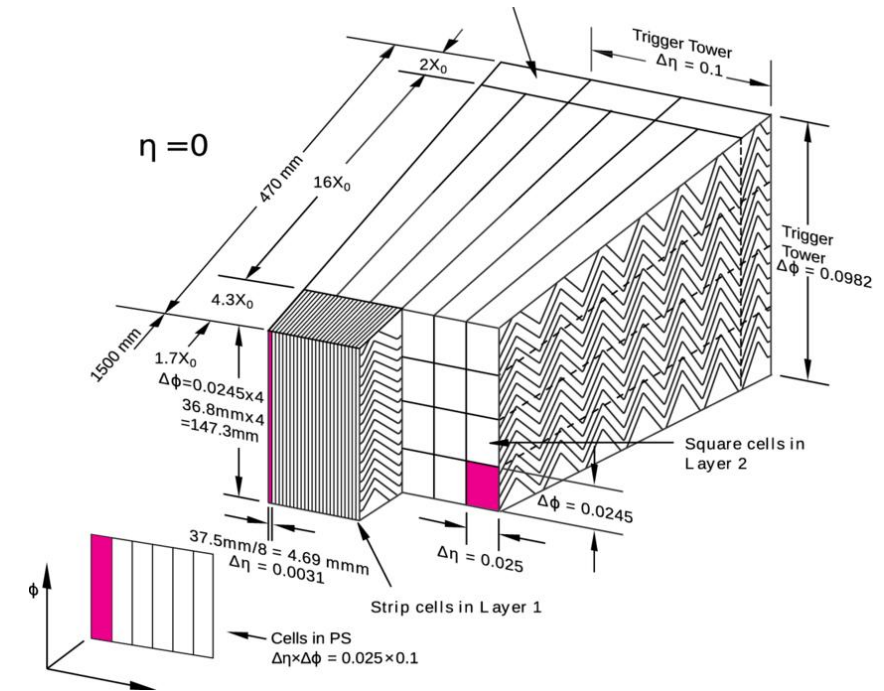


Calorimetro Elettromagnetico

- Per elettroni e fotoni
- Barrel: $|\eta| < 1.475$
- 2 end-cap: $1.375 < |\eta| < 3.2$
- Materiale attivo: Argon liquido $\rightarrow$ rileva energia depositata
- Materiale assorbitore: piombo $\rightarrow$ assorbe energia particelle
- Nel piombo avviene la cascata e si formano sciame



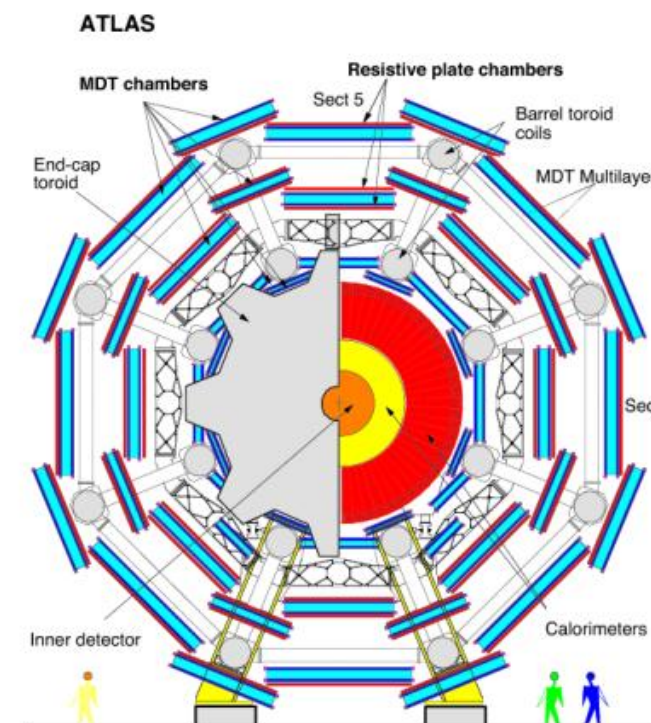
Si misura tutta l'energia





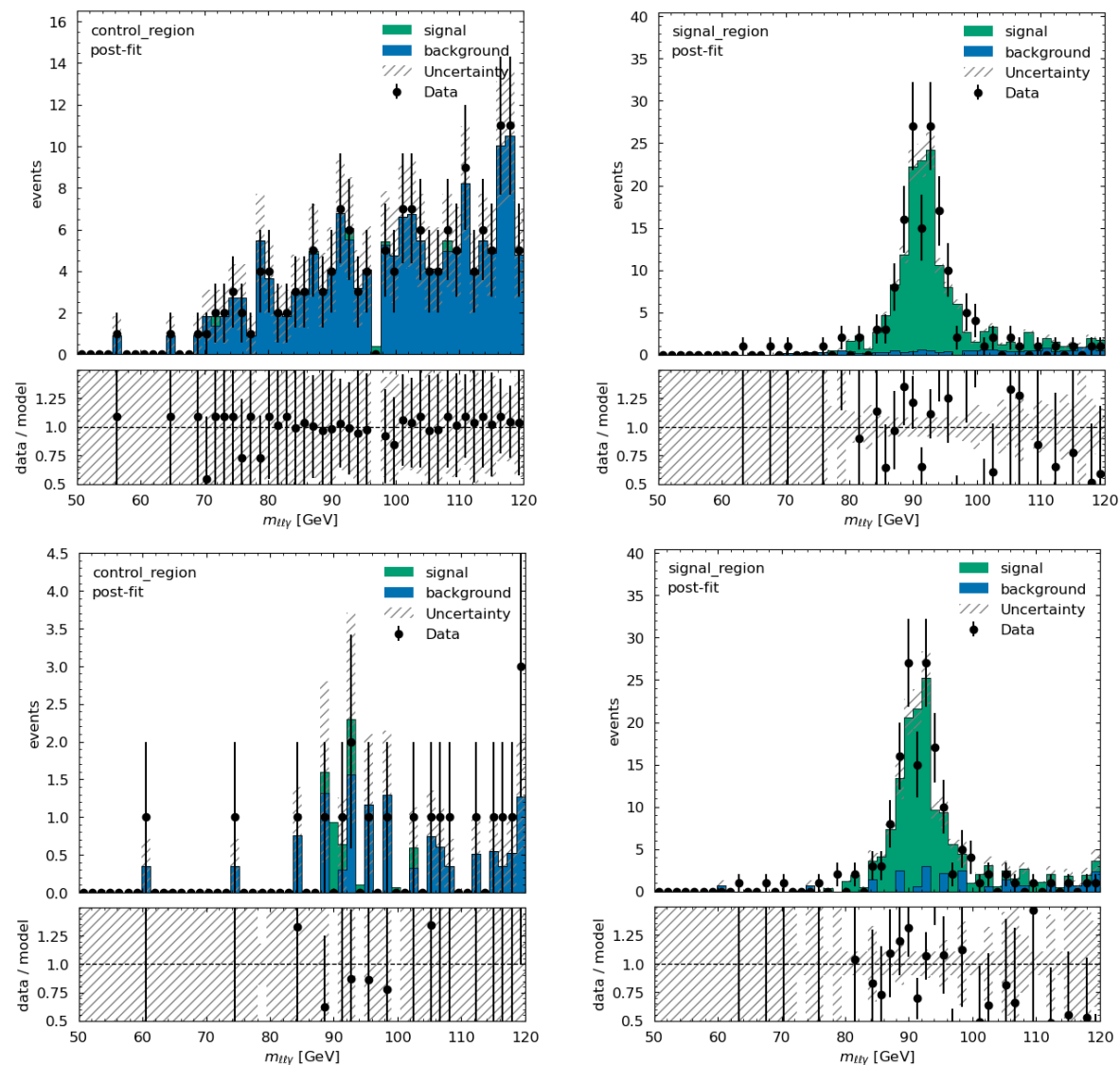
Muon Spectrometer

- Per i muoni che passano indisturbati i calorimetri
- Barrel: $|\eta| < 1.2$
- 2 end-cap: $|\eta| < 2.7$
- Campo magnetico toroidale devia la traiettoria dei muoni misurandone il momento in 3 stazioni
- Le stazioni sono costituite da tubi MDT





Fit con $\eta = [0 - 0.6]$; $P_T = [10 - 15]$



Caso nominale

POSTFIT			
Canale	Campione	Yield	Errore
CR	Background	159.5834	± 12.7067
CR	Segnale	2.2278	± 1.4925
SR	Background	14.9108	± 6.0469
SR	Segnale	141.0799	± 12.7565

$$\mu_{SR} = 0.8876 \pm 0.1331$$

$$\kappa_{bkg} = 0.0934 \pm 0.0192$$

CR variata

POSTFIT			
Canale	Campione	Yield	Errore
CR	Background	12.3021	± 3.7397
CR	Segnale	2.7298	± 1.6522
SR	Background	23.1957	± 8.7829
SR	Segnale	132.8039	± 13.7287

$$\mu_{SR} = 0.8355 \pm 0.0451$$

$$\kappa_{bkg} = 1.8855 \pm 0.0326$$



Fit simultanei in SR e CR

- Confronto tra:

- bkg MC in SR
- bkg MC in CR e
- dati nella CR (con il leakage rimosso)

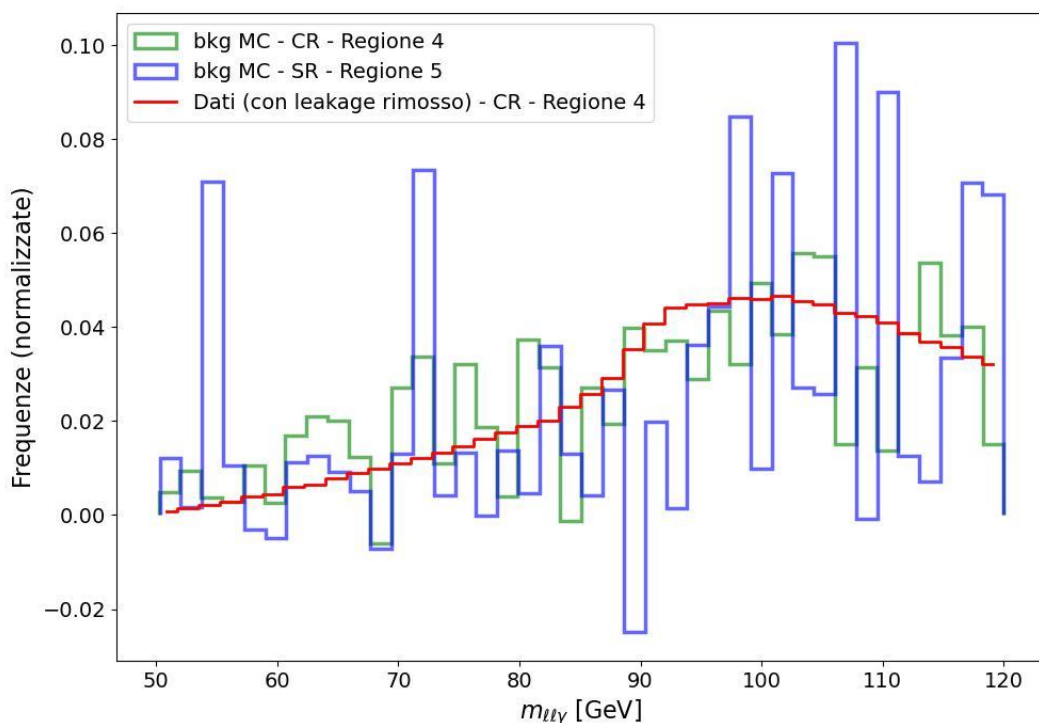


dati in CR descrivano
il bkg in SR



Utilizzato come
background nel Fit

Numeratore



Denominatore

