

# Forward-backward asymmetry of Drell-Yan events in pp collisions at 13 TeV, using CMS Open Data

Giulia Belotti

## 1 Introduzione

Il repository [CMEPDA\\_Exam\\_DrellYanEvents-13TeV](#) contiene l'analisi dell'asimmetria forward-backward degli eventi di Drell Yan, in collisione pp, usando i CMS Open Data a 13 TeV con una luminosità integrata  $\mathcal{L} = 41.6 fb^{-1}$ , sulla base dei risultati presentati dalla collaborazione CMS <sup>1</sup>.

Sono state effettuate tre diverse analisi: distribuzione in massa invariante, distribuzione in  $\cos \theta^*$  e asimmetria forward-backward, sia per il canale di-muon che per quello di-electron, a seconda del decadimento del bosone Z. Tramite parametri opzionali, l'utente può scegliere da riga di comando quale analisi effettuare, mentre con un parametro posizionale specifica per quale particella.

## 2 Analisi

### 2.1 Import e selezione degli eventi

Per prima cosa i dataset e la simulazione Monte-Carlo utilizzati sono stati importati come RDataFrame dal [CMS Open Data Portal](#) e sono stati filtrati al fine di selezionare i due leptoni provenienti dal decadimento della Z. In Tabella 1, sono riportate le condizioni imposte

Muons ( $\mu$ )	Electrons ( $e$ )
Muon_ $p_T$ > 25, 15 GeV	Electron_ $p_T$ > 30, 20 GeV
Muon_ $\eta$   < 2.4	Electron_ $\eta$   < 2.4
Opposite-sign electric charges	Opposite-sign electric charges
Muon_pfRelIso03_all < 0.1	Electron_pfRelIso03_all < 0.15
Muon_mediumId0 > 0	Electron_cutBased >= 3
Muon_dxy < 0.2 cm	

Tabella 1: Tabella delle condizione imposte

I tagli comuni ad entrambi i leptoni di decadimento sono passati come stringa da riga di comando, in modo tale che l'utente può scegliere se cambiarne i valori o lasciare quelli di default, elencati in tabella. Tramite la funzione Snapshot, gli eventi così selezionati vengono salvati in un due file ".root", uno per i dati e uno per il MC, all'interno di una cartella "data", per poter essere analizzati successivamente. Ciascuno dei due file contiene un TTree i cui branches corrispondono al  $p_T$ ,  $\eta$ ,  $\phi$ , massa e numero delle particelle che hanno superato la selezione.

Per ottimizzare l'analisi e rendere il programma più leggibile, è stata scritta in C++ una libreria, chiamata Vector\_Library.h, nella quale sono state definite tutte le funzioni necessarie per operare sugli RDataFrame,

---

<sup>1</sup>L'articolo di riferimento scelto è: Measurement of the weak mixing angle using the forward-backward asymmetry of Drell-Yan events in pp collisions at 8 TeV [arXiv:1806.00863v2 \[hep-ex\]](#)

considerando gli eventi come PtEtaPhiMVector di ROOT. Questa libreria viene interpretata da Python tramite il comando `ROOT.gInterpreter.ProcessLine('#include "src/Vector_Library.h")`.

## 2.2 Distribuzione in massa invariante

Dopo aver calcolato il valore della massa invariante e della rapidità del sistema dei due leptoni, gli eventi vengono filtrati, tramite il comando Filter, in tre diversi range di rapidità:  $0 < |y| < 0.4$ ,  $0.8 < |y| < 1.2$ ,  $1.6 < |y| < 2.0$ . Il risultato di questa analisi sono quindi tre istogrammi 1D, uno per ogni range considerato. (Figura 1)

## 2.3 Distribuzione in angolo

Nel sistema di riferimento Collins-Soper<sup>2</sup> della coppia di leptoni,  $\theta^*$  è l'angolo del leptone negativo  $\ell^-$  rispetto all'asse che divide a metà l'angolo tra la direzione di un quark e quella inversa dell'antiquark. In collisioni pp, è più probabile che la direzione del quark sia quella del boost di Lorentz del sistema dei di-leptoni, quindi vale che, nel sistema del laboratorio:

$$\cos \theta^* = \frac{2(P_1^+ P_2^- - P_1^- P_2^+)}{\sqrt{m_{\ell\ell}^2(m_{\ell\ell}^2 + p_{T,\ell\ell}^2)}} \frac{p_{z,\ell\ell}}{|p_{z,\ell\ell}|}$$

in cui  $m_{\ell\ell}$ ,  $p_{T,\ell\ell}$  e  $p_{z,\ell\ell}$  sono rispettivamente la massa, l'impulso trasverso e l'impulso longitudinale del sistema dei di-leptoni e  $P_i^\pm = (E_i \pm p_{z,i})/\sqrt{2}$ .

Calcolando il valore del  $\cos \theta^*$  in questo modo, filtrando i dati per i range in rapidità sopra citati e riempiendo tre diversi istogrammi 1D, si ottiene la distribuzione in angolo per entrambi i canali. (Figura 2)

## 2.4 Plotting delle due distribuzioni

Per sovrapporre i dati e le simulazioni Monte-Carlo, al fine di verificarne l'accordo, gli eventi Monte-Carlo vengono scalati opportunamente in fase di plotting, dividendo l'istogramma per il numero di eventi MC e moltiplicandolo per il numero di eventi provenienti dai dati. Nella distribuzione in massa invariante c'è un ottimo accordo dati-MC e il rapporto tra i due istogrammi tende ad 1. Nella distribuzione in angolo, invece, il rapporto tra i due è  $>1$  quando  $|\cos \theta^*| \rightarrow 1$ ; questo comportamento è dovuto al fatto che in queste zone si ha maggior contributo degli eventi di fondo, che però non sono stati considerati in questa analisi.

## 2.5 Asimmetria Forward-backward $A_{FB}$

La asimmetria forward-backward è direttamente connessa al valore di  $\cos \theta^*$ . Il valore di  $A_{FB}$  in ogni bin  $(m_{\ell\ell}, y_{\ell\ell})$  è calcolata usando il metodo "angular event weighting", secondo il quale ogni evento con un valore di  $\cos \theta^*$  (indicato con la lettera c), si riflette nel numeratore e nel denominatore di alcuni pesi attraverso le relazioni:

$$w_D = \frac{1}{2} \frac{c^2}{(1 + c^2 + h)^3} \quad w_N = \frac{1}{2} \frac{|c|}{(1 + c^2 + h)^2}$$

dove  $h = 0.5A_0(1 - 3c^2)$  con  $A_0 = 0.1$  in ogni bin  $(m_{\ell\ell}, y_{\ell\ell})$ . Usando le somme pesate N e D per gli eventi forward ( $\cos \theta^* > 0$ ) e backward ( $\cos \theta^* < 0$ ), si ottiene:

$$\begin{aligned} D_F &= \sum_{c>0} w_D & D_B &= \sum_{c<0} w_D \\ N_F &= \sum_{c>0} w_N & N_B &= \sum_{c<0} w_N \end{aligned}$$

---

<sup>2</sup>Angular distribution of dileptons in high-energy hadron collisions - John C. Collins and Davison E. Soper Phys. Rev. D 16, 2219 – Published 1 October 1977 DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.16.2219>

grazie ai quali, l'asimmetria diventa:

$$A_{FB} = \frac{3}{8} \frac{N_F - N_B}{D_F + D_B}$$

Dopo aver calcolato il valore del  $\cos\theta^*$ , i dataframe dei soli dati vengono filtrati in modo da separare gli eventi forward da quelli backward.  $D_F$ ,  $D_B$ ,  $N_F$  e  $N_B$  sono definiti come istogrammi 2D, così da ottenere il valore di  $A_{FB}$  per ogni bin  $(m_{\ell\ell}, y_{\ell\ell})$ . Grazie alla funzione di ROOT, ProjectionX, che proietta lungo l'asse X un istogramma 2D in uno 1D, si ottiene  $A_{FB}$  in sei diversi range in rapidità  $0 < |y| < 0.4$ ,  $0.4 < |y| < 0.8$ ,  $0.8 < |y| < 1.2$ ,  $1.2 < |y| < 1.6$ ,  $1.6 < |y| < 2.0$ ,  $2.0 < |y| < 2.4$ . (Figura 3)

Quello che si nota è una asimmetria in avanti al crescere della rapidità.

Il programma costruisce una cartella chiamata "Plot" e due sottocartelle chiamate "Muon" ed "Electron" dove vengono salvati automaticamente, in formato png, tutti i plot ottenuti nelle tre analisi per entrambe le particelle.

### 3 Test

Gli unittest sono stati scritti per testare la selezione delle particelle, la distribuzione in massa invariante e in angolo, la asimmetria forward-backward e la libreria Vector\_Library.h e si trovano all'interno di una cartella "Test".

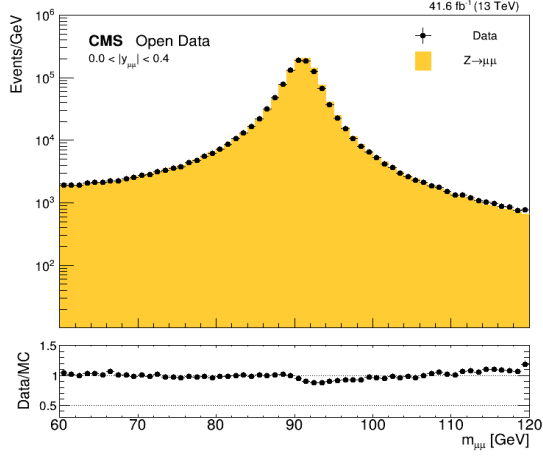
La selezione delle particelle viene testata su un campione di 1000 eventi; vengono generati due file ".root" salvati automaticamente nella stessa cartella di test, e quello che viene verificato è che le particelle selezionate abbiano il corretto taglio in  $p_T$  e  $\eta$ .

Per testare le distribuzioni in massa invariante e in angolo, si controlla che gli istogrammi restituiti dalle rispettive analisi, abbiano le giuste proprietà di plotting, mentre per quanto riguarda la asimmetria forward-backward si verifica solamente il tipo dell'istogramma restituito.

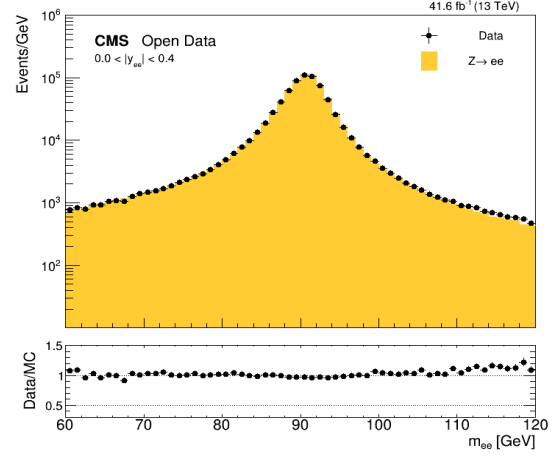
Infine per testare la libreria Vector\_Library.h, vengono definiti arbitrariamente due PtEtaPhiMVector e si controlla che il risultato delle funzioni definite nella libreria sia coerente con quanto atteso.

### 4 Documentazione

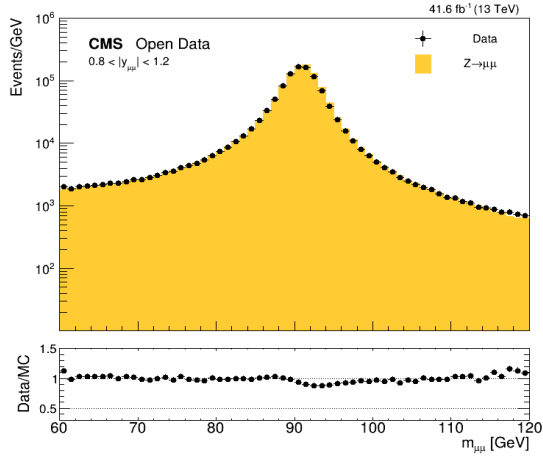
La documentazione è stata realizzata tramite Sphinx e può essere trovata [qui](#).



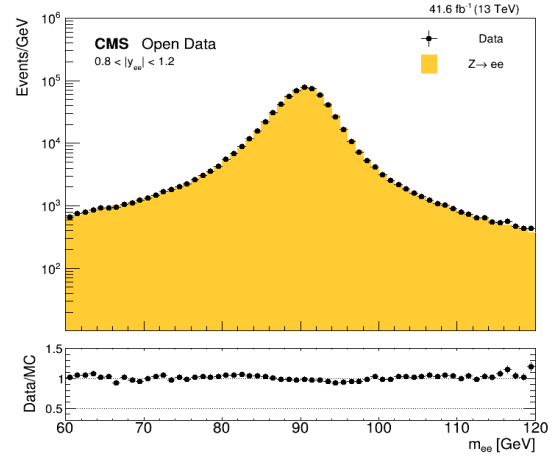
(a)



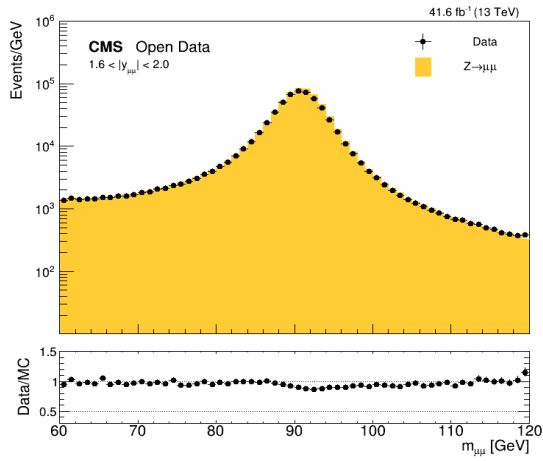
(b)



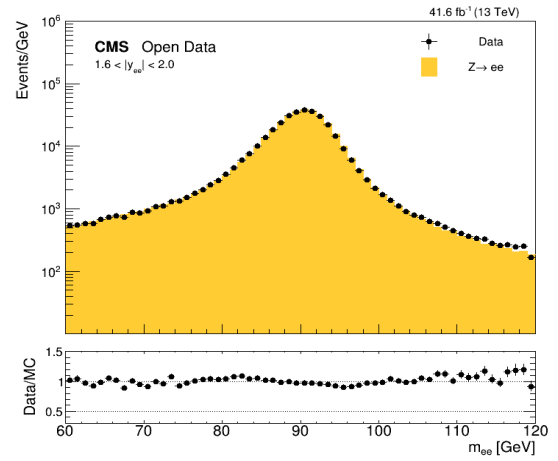
(c)



(d)

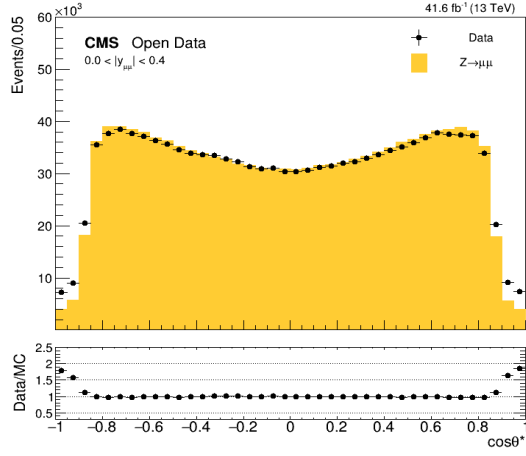


(e)

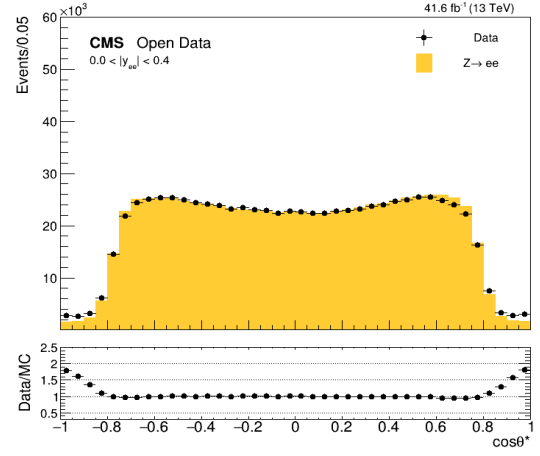


(f)

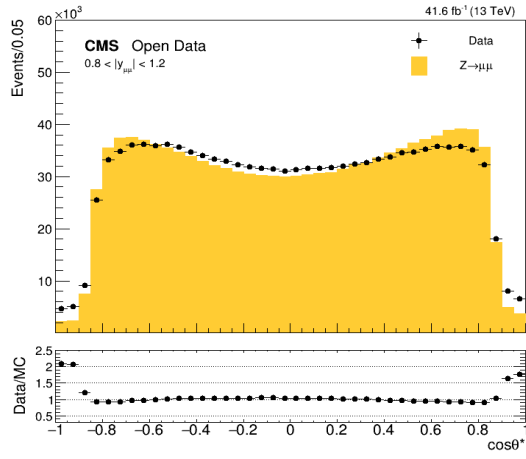
Figura 1: Distribuzione in massa invariante per il canale di-muon (a sinistra) e di-electron (a destra) in tre bin di rapidità



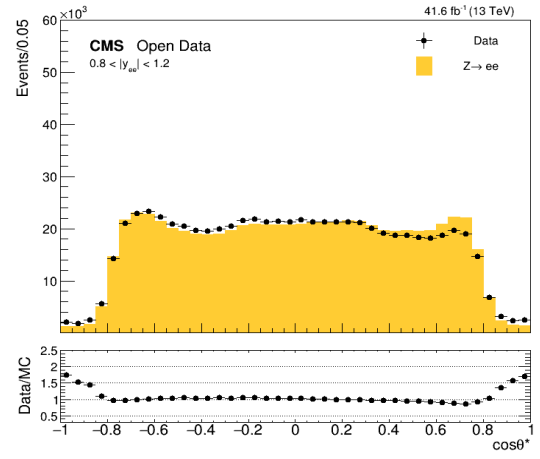
(a)



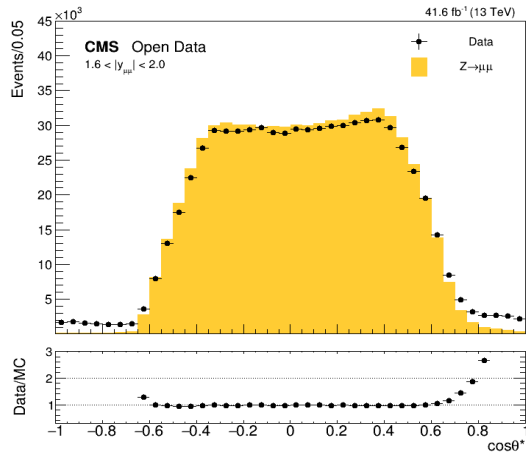
(b)



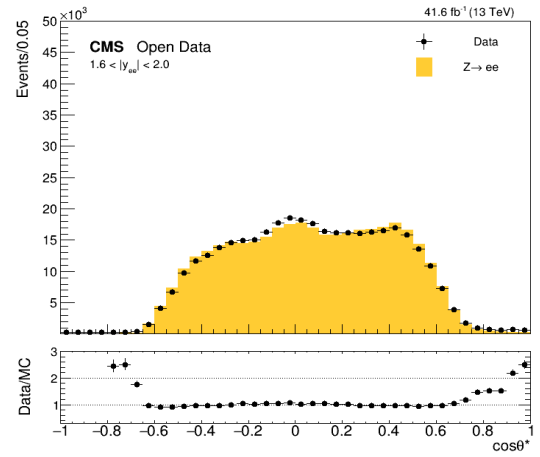
(c)



(d)

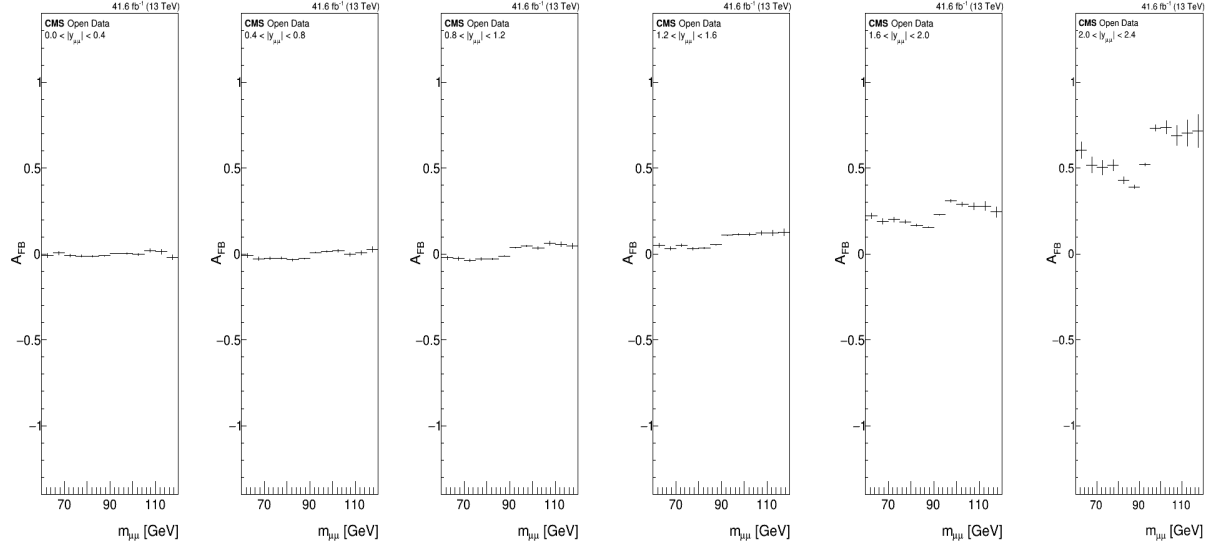


(e)

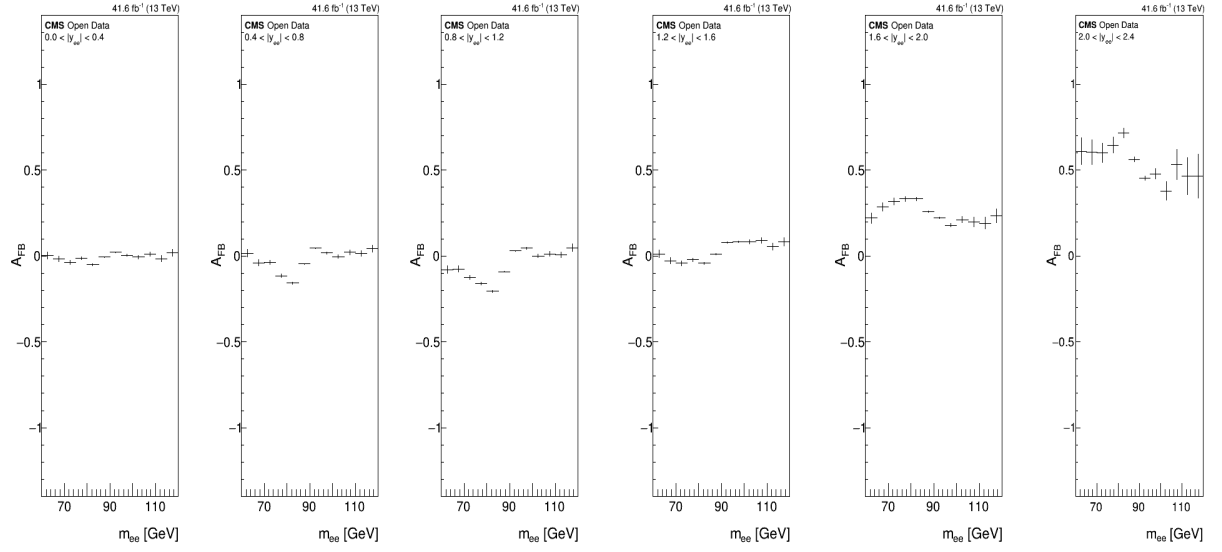


(f)

Figura 2: Distribuzione in  $\cos\theta^*$  per il canale di-muon (a sinistra) e per il canale di-electron (a destra) in tre bin di rapidità



(a)



(b)

Figura 3: Grafico comparativo in sei bin di rapidità dell'asimmetria forward-backward per il canale di-muon (a) e per il canale di-electron (b)