

Mesure de l'asymétrie avant-arrière A_{FB} avec le détecteur CMS

Exercices dirigés du cours *Physique des particules* - PHYSF416

Année académique 2017-2018

- 1 Présentation
- 2 Introduction théorique
- 3 Le détecteur CMS
- 4 Les outils de base
- 5 Introduction au C++ et à ROOT
- 6 Exercice 1: calculer l'asymétrie A_{FB} théorique
- 7 Exercice 2: simulations Monte Carlo
- 8 Exercice 3: analyse des données CMS
- 9 Rapport écrit

Section 1

Présentation

Déroulement des exercices:

- 4 séances de 3h
 - ▶ Les mardis 07-14-21-28/11 de 13h à 16h
 - ▶ (Mardi 05/12 de 13h à 16h pour une séance Q&A)
- Répartition du travail:
 - ▶ Essentiellement en classe
 - ▶ A terminer chez vous

Présentation de vos résultats:

- Rapport écrit
 - ▶ Introduction du contexte théorique et expérimental
 - ▶ Sélection des événements, histogrammes pertinents
 - ▶ Résultats commentés

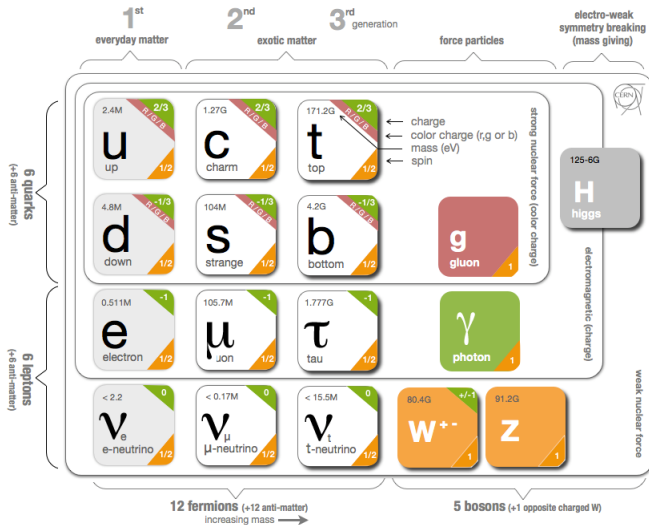
Encadrement

- David Vannerom: david.vannerom@ulb.ac.be
- Reza Goldouzian: reza.goldouzian@cern.ch
- Diego Beghin: Diego.Beghin@ulb.ac.be

Section 2

Introduction théorique

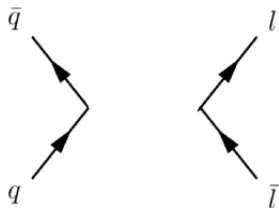
Le Modèle Standard (SM)



DY \equiv annihilation d'une paire de quarks pour donner une paire de leptons chargés:

$$q\bar{q} \rightarrow l\bar{l}$$

Quels sont les diagrammes possibles?



Le processus Drell-Yan (DY)

DY \equiv annihilation d'une paire de quarks pour donner une paire de leptons chargés:

$$q\bar{q} \rightarrow l\bar{l}$$

Quels sont les diagrammes **importants**?

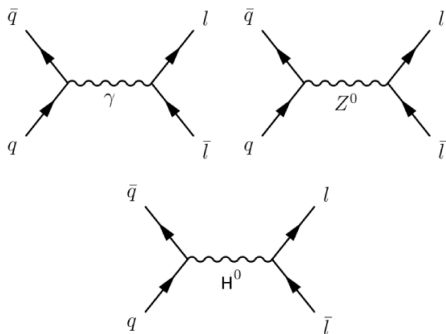


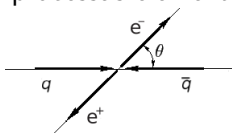
Diagramme de Feynman = Nombre complexe (élément de matrice \mathcal{M}):

$$\mathcal{M}_\gamma = \begin{array}{c} \bar{q} \quad l \\ \swarrow \quad \searrow \\ \text{---} \gamma \text{---} \\ \swarrow \quad \searrow \\ q \quad \bar{l} \\ \bar{q} \quad l \\ \swarrow \quad \searrow \\ \text{---} Z^0 \text{---} \\ \swarrow \quad \searrow \\ q \quad \bar{l} \end{array}$$

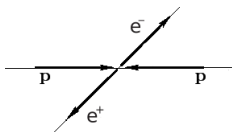
La section efficace σ d'un processus faisant intervenir plusieurs diagrammes est définie par:

$$\begin{aligned} \sigma &= \left| \sum_{i=1}^{N_{\text{processus}}} \mathcal{M}_i \right|^2 \\ &= |\mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_Z|^2 \\ &= |\mathcal{M}_\gamma|^2 + |\mathcal{M}_Z|^2 + \mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_Z^* + \mathcal{M}_\gamma^* \mathcal{M}_Z \\ &= \text{Photon-only} + \text{Z-only} + \text{Interference} \end{aligned}$$

Avant de discuter le résultat du calcul des sections efficaces, un peu de cinématique. Distinguons le processus élémentaire DY:



de la collision proton-proton:



- \sqrt{s} = énergie dans le centre de masse $p - p$
- $\sqrt{s'}$ = énergie dans le centre de masse $q - \bar{q}$
- θ = angle entre la direction du quark initial et du lepton final

Voici l'expression des sections efficaces différentielles:

Photon-only:

$$\frac{d\sigma_\gamma}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} [(1 + \cos \theta)^2 + (1 - \cos \theta)^2]$$

Z-only:

$$\frac{d\sigma_Z}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} |\mathcal{R}|^2 [c_{1,Z}(1 + \cos \theta)^2 + c_{2,Z}(1 - \cos \theta)^2]$$

Interférence:

$$\frac{d\sigma_{int}}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} \text{Re}(\mathcal{R}) [c_{1,int}(1 + \cos \theta)^2 + c_{2,int}(1 - \cos \theta)^2]$$

Voici l'expression des sections efficaces différentielles:

Photon-only:

$$\frac{d\sigma_\gamma}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} [(1 + \cos\theta)^2 + (1 - \cos\theta)^2]$$

Z-only **ASYMETRIQUE EN θ** : $\sigma(\pi - \theta) \neq \sigma(\theta)$:

$$\frac{d\sigma_Z}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} |\mathcal{R}|^2 [c_{1,Z}(1 + \cos\theta)^2 + c_{2,Z}(1 - \cos\theta)^2]$$

Interférence **ASYMETRIQUE EN θ** : $\sigma(\pi - \theta) \neq \sigma(\theta)$:

$$\frac{d\sigma_{int}}{d\Omega} = \frac{e^4}{(4\pi)^2} Q_q^2 Q_l^2 \frac{1}{8s'} \text{Re}(\mathcal{R}) [c_{1,int}(1 + \cos\theta)^2 + c_{2,int}(1 - \cos\theta)^2]$$

On peut séparer la section efficace totale en deux parties:

- Avant (Forward): $\sigma_F = \sigma_{\theta < \pi/2}$
 - ▶ Evénements avec le lepton final dans **la même direction** que le quark initial
- Arrière (Backward): $\sigma_B = \sigma_{\theta > \pi/2}$
 - ▶ Evénements avec le lepton final dans **la direction opposée** à celle du quark initial

Et définir l'asymétrie avant-arrière:

$$A_{FB} = \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}$$

L'asymétrie avant-arrière (A_{FB})

Si on exprime A_{FB} en fonction des variables du problème, on obtient:

$$A_{FB} = \frac{3}{8} \frac{c_2}{c_1}$$

où:

$$c_1 = 1 + 2 \operatorname{Re}(R) g_{VI} g_{Vq} + |R|^2 (g_{VI}^2 + g_{AI}^2) (g_{Vq}^2 + g_{Aq}^2)$$

$$g_{AI,q} = -I_{WI,q}^3$$

$$c_2 = 4 \operatorname{Re}(R) g_{AI} g_{Aq} + 8 |R|^2 g_{VI} g_{AI} g_{Vq} g_{Aq}$$

$$g_{VI,q} = I_{WI,q}^3 - 2 Q_{l,q} \sin^2 \theta_W$$

$$R = \frac{1}{Q_l Q_q \sin^2 2\theta_W} \frac{s'}{s' - M_Z^2 + i s' \Gamma_Z / M_Z}$$

	Q	I_W^3
e	-1	-1/2
u	2/3	1/2
d	-1/3	-1/2

Est-ce que A_{FB} est une constante?

L'asymétrie avant-arrière (A_{FB})

Si on exprime A_{FB} en fonction des variables du problème, on obtient:

$$A_{FB} = \frac{3}{8} \frac{c_2}{c_1}$$

où:

$$c_1 = 1 + 2 \operatorname{Re}(R) g_{Vl} g_{Vq} + |R|^2 (g_{Vl}^2 + g_{Al}^2) (g_{Vq}^2 + g_{Aq}^2)$$

$$g_{Al,q} = -I_{Wl,q}^3$$

$$c_2 = 4 \operatorname{Re}(R) g_{Al} g_{Aq} + 8 |R|^2 g_{Vl} g_{Al} g_{Vq} g_{Aq}$$

$$g_{Vl,q} = I_{Wl,q}^3 - 2 Q_{l,q} \sin^2 \theta_W$$

$$R = \frac{1}{Q_l Q_q \sin^2 2\theta_W} \frac{s'}{s' - M_Z^2 + i s' \Gamma_Z / M_Z}$$

	Q	I_W^3
e	-1	-1/2
u	2/3	1/2
d	-1/3	-1/2

$\Rightarrow A_{FB}$ dépend de s' , de l'énergie de la collision!

Le but de ces séances d'exercices sera de:

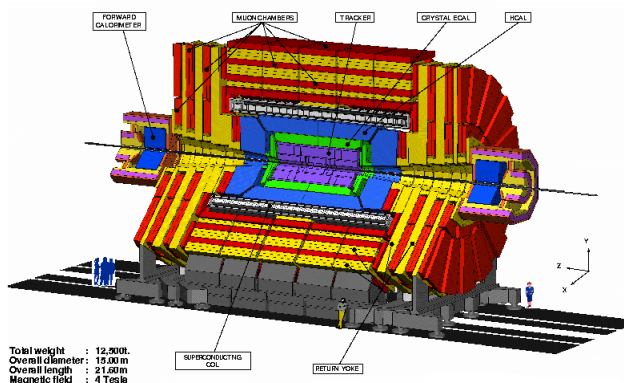
- **Calculer** la valeur théorique de A_{FB}
- **Calculer** A_{FB} en utilisant des simulations numériques
- **Mesurer** A_{FB} dans les données du détecteur CMS
- **Comparer** la théorie à la mesure et interpréter les résultats

Section 3

Le détecteur CMS

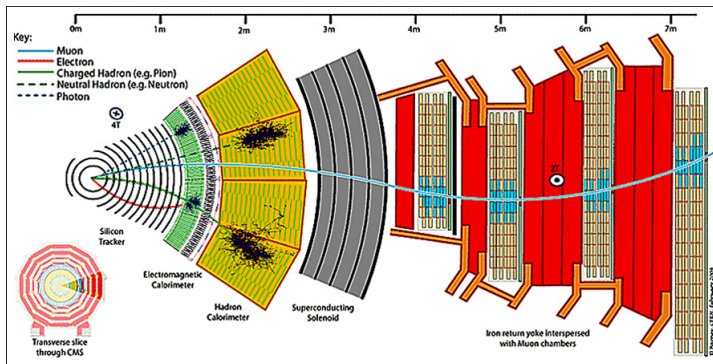
Le détecteur CMS

CMS \equiv *Compact Muon Solenoid*



CMS: assemblage de couches (sous-détecteurs) remplissant chacun une tâche.

Voici une vue transverse de CMS:





Simulations			
Information accessible			
Génération des événements (Monte Carlo) Collisions proton-proton	Simulation des interactions particules-CMS Interaction particules-CMS	Reconstruction	Analyse
Information inaccessible	Information accessible		
Données			

Un peu de vocabulaire. Pour les simulations, on parle de:

- *Niveau généré*: niveau d'analyse avant l'interaction des particules avec le détecteur
- *Niveau reconstruit*: niveau d'analyse après la simulation de l'interaction des particules avec le détecteur et le processus de reconstruction



Parler de niveau généré pour les données n'a pas de sens puisqu'on a seulement accès aux informations après interaction des particules avec le détecteur!

Section 4

Les outils de base

Vous allez travailler sur une machine virtuelle. Pour y accéder, ouvrez *Virtual Box* et démarrez la session. Votre mot de passe est `labo;123`.

Pour ouvrir un fichier, `emacs` est conseillé:

```
emacs -nw file
```

Quelques astuces:

- Chercher un mot: `ctrl+s` puis tapez le mot dans le *minibuffer* en bas
- Sauver vos modifications: `ctrl+x` puis `ctrl+s` sans lâcher le `ctrl`
- Fermer le fichier: `ctrl+x` puis `ctrl+c` sans lâcher le `ctrl`

- `ls`: *list*, liste les fichiers présents dans le dossier courant
- `cd dir`: *change directory*, rentre dans le dossier `dir`
- `mkdir dir`: *make directory*, crée le dossier `dir`
- `mv file dir`: *move*, bouge le fichier `file` dans le dossier `dir`
- `mv file1 file2`: *move*, renomme le fichier `file1` en `file2`
- `cp file dir`: *copy*, copie le fichier `file` dans le dossier `dir`
- Un point `.` indique le dossier courant
- Deux points `..` indiquent le dossier parent

Section 5

Introduction au C++ et à ROOT

En C++, on peut définir des objets auxquels sont associées plusieurs méthodes. On utilise pour cela des classes:

myObject.h

```
//include here what you need for your methods
#include <iostream>

class myObject{
public:
    //methods declaration here
    void PrintSomething();
    double GiveMeThisNumber(double a);
}; //This ; is MANDATORY
```

myObject.C

```
#include "myObject.h"

//Define here the methods you declared in the .h

//Do not forget to write "myObject::"
void myObject::PrintSomething(){
    cout<<"Hello!"<<endl;
}

double myObject::GiveMeThisNumber(double a){
    cout<<a<<endl;
    return a;
}
```

La classe *myObject* est définie par:

- `myObject.h`: déclare les méthodes
- `myObject.C`: définit les méthodes pré-déclarées

Pour utiliser la classe *myObject* avec ROOT, suivez les commandes suivantes:

```
root -l
root [0] .L myObject.C++

root [1] myObject jack
root [2] jack.PrintSomething()
Hello!
root [3] jack.GiveMeThisNumber(3.876)
3.876
```

- root [0]: compilation de la classe
- root [1]: création d'un nouvel objet *jack* de la classe *myObject*
- root [2]: appel de la méthode `PrintSomething` de la classe
- root [3]: appel de la méthode `GiveMeThisNumber` de la classe

ROOT organise l'information sous forme d'arbres (on parle de *trees* ou de *ntuples*):

- 1 collision = 1 entrée
- 1 variable = 1 branche (e.g. énergie de l'électron, angle ϕ du muon, etc.)

Exemple d'un tree contenant l'information de 3 évènements et 3 branches (X-pos, Y-pos et Energy):

Entry number	X-pos	Y-pos	Energy
1	13	0	17
2	24	-3	15
3	35	9	8

Section 6

Exercice 1: calculer l'asymétrie A_{FB} théorique

Exercice 1: calculer l'asymétrie A_{FB} théorique



Ouvrez la macro: `Compute_AFB.C`

Modifiez-là et complétez-là pour obtenir les histogrammes d'asymétrie avant-arrière dans les deux cas suivants:

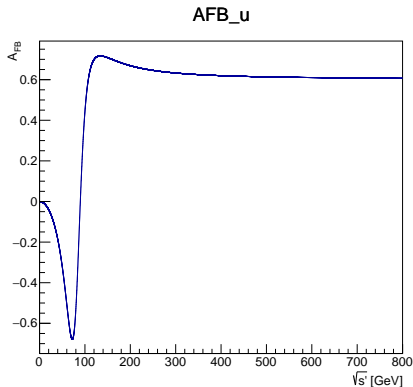
- $u\bar{u} \rightarrow e^+e^-$
- $d\bar{d} \rightarrow e^+e^-$

Plus d'info au début de la macro dans les commentaires. Pour lancer la macro:

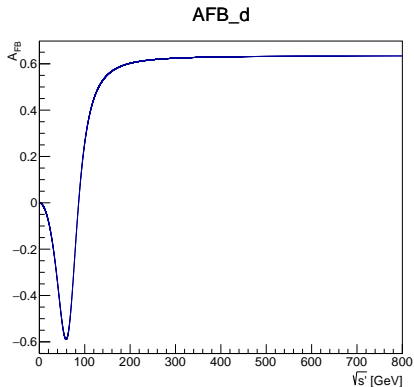
```
root Compute_AFB.C+
```

Exercice 1: résultat

Vous devez obtenir ces deux histogrammes:



$$u\bar{u} \rightarrow e^+e^-$$



$$d\bar{d} \rightarrow e^+e^-$$

Section 7

Exercice 2: simulations Monte Carlo

Analyse de simulations MC à l'aide de la macro Analysis.C.

Analysis.C fait appel à un *header*, Analysis.h où est déterminé quel fichier ROOT est utilisé. A partir de la ligne 106:

```
TChain * chain = new TChain("tree","");  
chain->Add("MC_DY.root");  
tree = chain;
```

Analysis.h liste aussi les variables incluses dans l'arbre, e.g.:

```
vector<float> *electron_pt;  
vector<float> *electron_energy;
```

Vous trouverez ce fichier, ainsi que la version à jour de Analysis.C et Analysis.h sur ma homepage:

<http://t2bweb.iihe.ac.be/~vannerom/PHYSF416/>

- Taille d'un vecteur en C++: `electron_pt->size()`
- Valeur de l'entrée i d'un vecteur: `electron_pt->at(i)`
- Remplir un histogramme: `Histo->Fill(variable,weight)`
- Somme d'histogrammes $H = H + H1$: `H- > Add(H1)`
- Différence d'histogrammes $H = H - H1$: `H- > Add(H1, -1)`
- Division d'histogrammes $H = H/H1$: `H- > Divide(H1)`

Etude des variables cinématiques

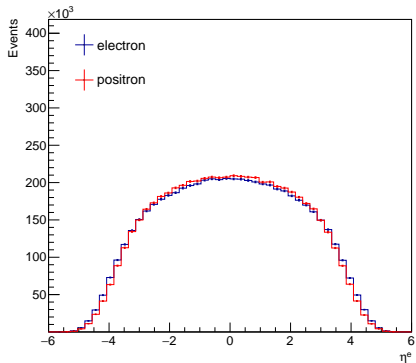
Modifiez la macro pour obtenir les histogrammes suivants au niveau généré:

- Impulsion transverse p_T des électrons ($e^- + e^+$)
- Pseudorapidité η des électrons
 - ▶ Superposez η^{e^-} et η^{e^+} pour:
 - ★ $M(e^+e^-) \in [0, Inf]$ (inclusif)
 - ★ $M(e^+e^-) \in [100, Inf]$
 - ▶ Discutez l'intérêt de ces distributions
- Angle azimuthal ϕ des électrons

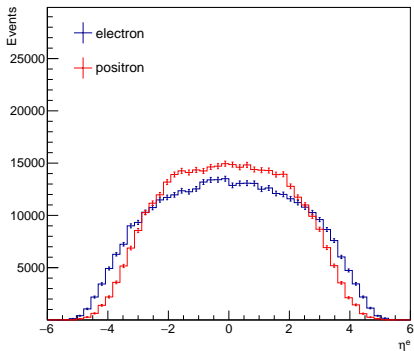
Commentez ces histogrammes (valeurs limites, forme (*shape*)).

Pour lancer la macro

- `root`
- `.L Analysis.C`
- `Analysis test`
- `test.Loop()`



Inclusif



$M(e^+e^-) > 100 \text{ GeV}$

Construisez ensuite le quadrivecteur de la paire e^+e^- . Obtenez les histogrammes suivants au niveau généré:

- Masse invariante $M(e^+e^-)$ de la paire e^+e^-
- Impulsion longitudinale $p_Z(e^+e^-)$ de la paire e^+e^-

Construisez également $M(e^+e^-)$ au niveau reconstruit et superposez-le à l'histogramme au niveau généré.

Pour lancer la macro

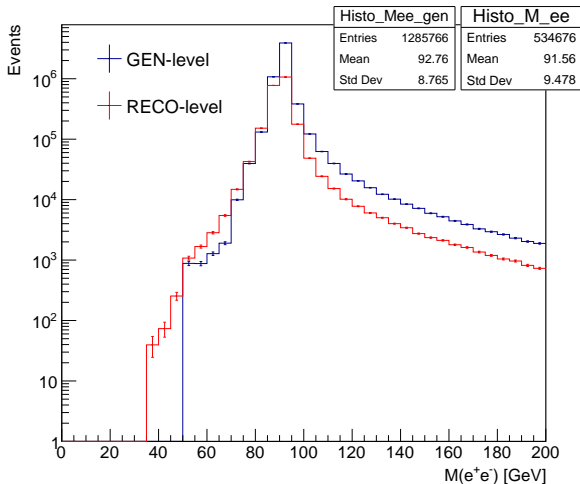
- `root`
- `.L Analysis.C`
- `Analysis test`
- `test.Loop()`

La masse invariante e^+e^- : résultat

Vous devez obtenir ces histogrammes:

Expliquez les différences:

- Nombre d'événements
- Largeur du pic
- Bornes

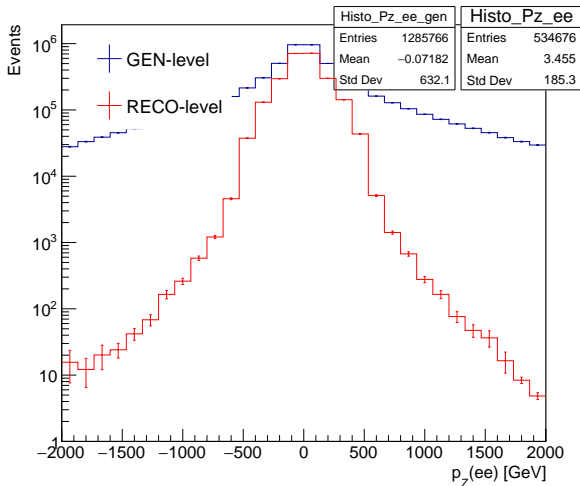


L'impulsion longitudinale e^+e^- : résultat

Vous devez obtenir ces histogrammes:

Expliquez les différences:

- Nombre d'événements
- Largeur du pic
- Bornes



Nous allons calculer A_{FB} de quatre façons différentes dans les simulations:

	GEN-GEN	GEN-RECO	RECO-GEN	RECO-RECO
Boost du quark	quark	quark	Z	Z
Electrons	GEN	RECO	GEN	RECO

La première partie du nom se réfère à l'information sur le boost longitudinal (p^z) du quark:

- quark: on utilise la vraie direction du quark
- Z: on suppose que le quark et le boson Z (le système e^+e^-) sont boostés dans la même direction

La seconde partie du nom se réfère au niveau de reconstruction de l'électron:

- GEN: on utilise les électrons au niveau généré
- RECO: on utilise les électrons au niveau reconstruit

L'asymétrie avant-arrière

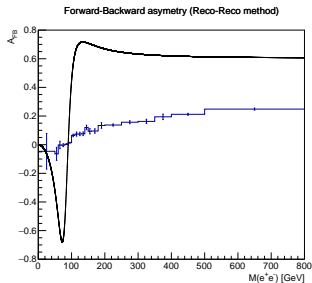
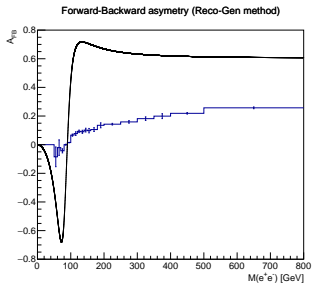
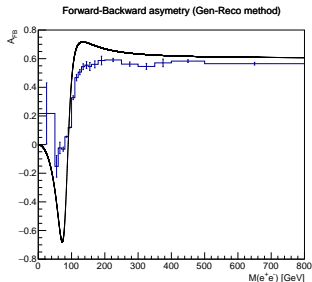
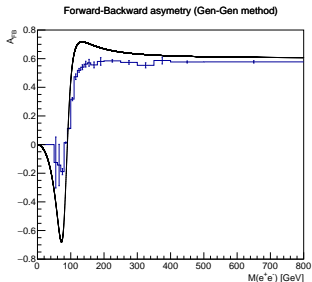
Voici la procédure GEN-GEN. Pour chaque événement:

- Déterminez la direction longitudinale du quark ($\text{sign}(p^z)$)
- Déterminez l'angle θ de l'électron dans le système du CM
 - ▶ Construisez le système e^+e^-
 - ★ `TLorentzVector v_ele, v_pos;`
 - ★ `v_ele.SetPtEtaPhiE(ele_pt, ele_eta, ele_phi, ele_E);`
 - ★ `v_ele+v_pos;`
 - ▶ Boostez les particules dans le référentiel du centre-de-masse
 - ★ `v_ele.Boost(-(v_ele+v_pos).BoostVector());`
 - ▶ Récupérez l'angle θ de l'électron dans le CM
 - ★ `v_ele.Theta();`
- Déduisez-en l'angle que fait l'électron avec le quark dans le référentiel du centre-de-masse
- En fonction de cet angle, remplissez un histogramme "forward" H_F ou "backward" H_B
- Construisez l'histogramme d'asymétrie: $H_{AFB} = \frac{H_F - H_B}{H_F + H_B}$

⇒ **Réitérez pour les autres cas!**

L'asymétrie avant-arrière: résultats

Voici les quatre histogrammes que vous devez obtenir:



Section 8

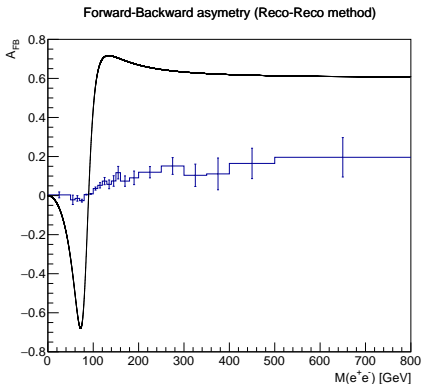
Exercice 3: analyse des données CMS

Vous travaillerez avec une partie des données 2016 récoltées par l'expérience CMS auprès du *Large Hadron Collider* du CERN. Appliquez la méthode "Reco-Reco" pour obtenir l'asymétrie avant-arrière. Voici le résultat:

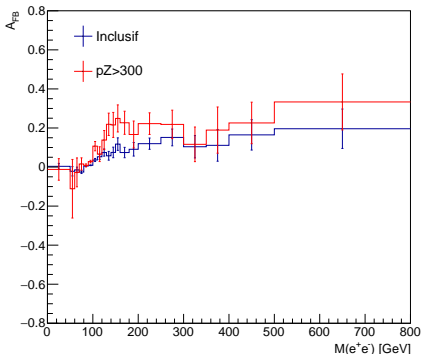
Sélection:

- $H/E < 0.1$
- $d_{xy} < 0.05$
- $\Sigma_{tracks} p_T < 5 \text{ GeV}$

Quelle est l'efficacité de la sélection?



Plus le Z est boosté longitudinalement, plus l'impulsion portée par le quark responsable du boost est importante. Vous verrez dans le cours de QCD que les *Parton Density Functions* indiquent que la probabilité pour un constituant du proton de porter une grande partie de son impulsion est beaucoup plus élevée pour les quarks de valence. A grand boost du Z, on a donc plus de chance que le parton responsable du boost soit un quark, et non un antiquark.



Section 9

Rapport écrit

Votre rapport doit être clair, précis, et cohérent. Le format Latex est recommandé. Voici un exemple de structure de rapport:

- Introduction: bien poser les bases et définir les buts du travail
 - ▶ Processus Drell-Yan, section efficace, asymétrie avant-arrière
 - ▶ CMS, le LHC
- Calcul théorique de l'asymétrie
- Etude des simulations Monte Carlo
 - ▶ Etude des variables cinématiques
 - ▶ Asymétrie avant-arrière dans les différents cas
- Analyse des données
 - ▶ Asymétrie avant-arrière

Pour chacune des figures que vous présentez, détaillez et expliquez ce qui s'y trouve, quelles ont été les sélections, hypothèses menant à ce résultat, pourquoi la figure est importante pour ce travail.