

# Mesures de précision des couplages des bosons $Z$ aux fermions lourds dans le futur collisionneur circulaire électron-positon (FCC-ee)

GRANJON Mathis

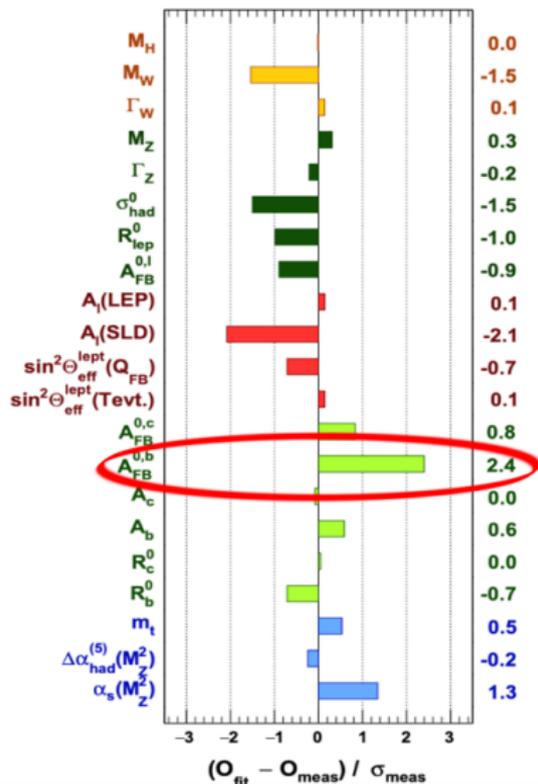
Physique parcours recherche fondamentale

Stage de master 1 physique



- 1 Physique qu'on étudie
- 2 Contexte : FCC
- 3 Mesure de l'asymétrie des quarks  $b$  et  $\bar{b}$ 
  - Outils
  - Analyse des données MC pour déduire  $A_{FB}$
- 4 Conclusion : Comparaison avec les valeurs du LEP

# Asymétrie avant-arrière



- $A_{FB} = \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}$   
avec  $\sigma = 2\pi \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d \cos \theta$
- Permet le calcul de  $\theta_W$  angle de mélange électrofaible
- Dernières mesures les plus précises : obtenues au LEP
- Valeur la plus éloignée du Modèle Standard ( $2.4\sigma$ )

# Futur Circular Collider



Projet en deux étapes :

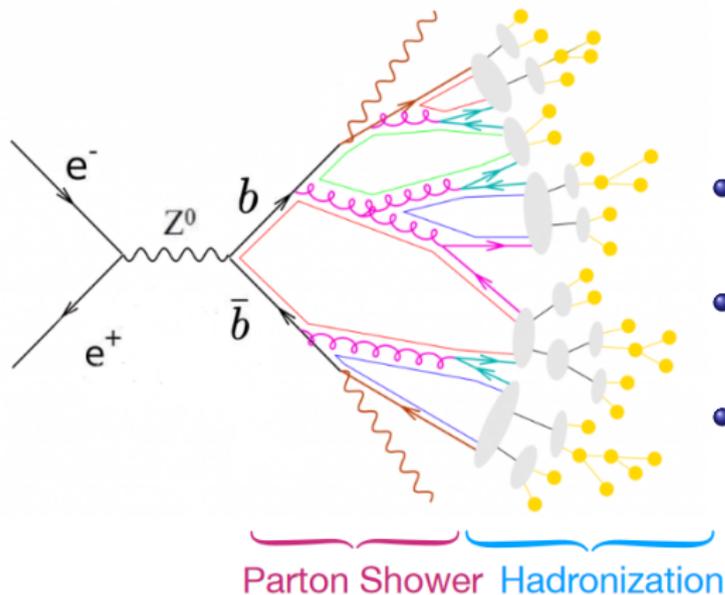
- Collisions  $e^+e^-$
- Collisions  $hh$

En mode  $e^+e^-$  :

- Énergie dans C.D.M : 91-380 GeV
- Circonférence : 100 km
- $10^{12}$  Bosons Z attendus contre  $10^7$  au LEP.



# Collision $e^+e^-$



Lors de la collision  $e^+e^-$  :

- Création paire lepton-antilepton chargés (10%)
- Création paire neutrino-antineutrino (20%)
- Création paire quark-antiquark (70%)

# Procédure d'analyse

## Générateur

Génère aléatoirement (Pythia8, EVTGEN, EDM4Hep) des événements comme ceux produits dans les accélérateurs de particules : données MC



## Simulation dans le détecteur (Delphes)

Détecteur générique avec une géométrie idéalisée



## Reconstruction

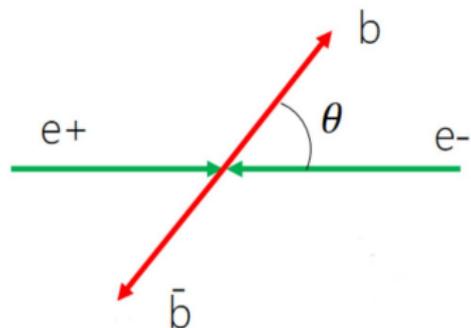
Reconstruction des particules après passage dans le détecteur : données EVT (pour  $Z \rightarrow b\bar{b}$ )



## Données à analyser

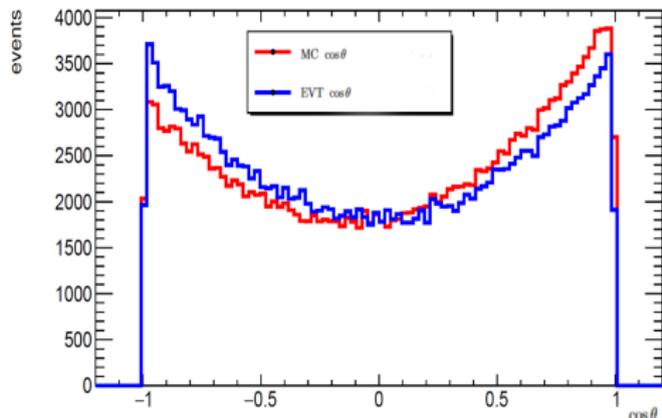
Utilisation du logiciel ROOT pour comparer les événements reconstruits EVT avec le MC.

# Asymétrie avant-arrière

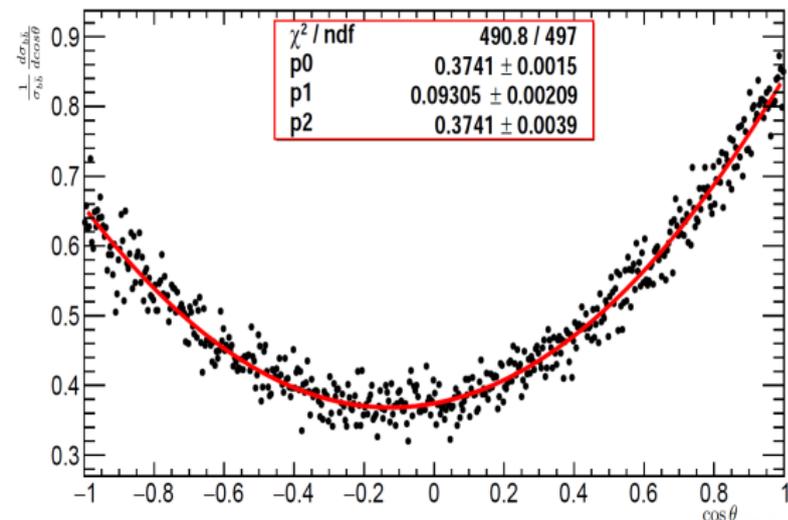


- Courbe rouge : données MC
- Courbe bleue : données EVT

- On trace la répartition des angles entre les quarks  $b$  et l'axe du faisceau, paramètre  $\cos(\theta)$



# Analyse des données MC pour déduire $A_{FB}^b$ avec BES



- On normalise la courbe rouge (MC) par le nombre d'entrées

- On a tracé  $\frac{1}{N} \frac{dN}{d\cos\theta}$

avec  $\sigma = N \times L$

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{d\cos\theta} \iff \frac{1}{\sigma_{b\bar{b}}} \frac{d\sigma_{b\bar{b}}}{d\cos\theta}$$

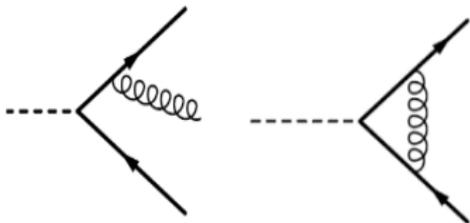
$$f(\cos\theta) = p_0 + p_1 \times \cos\theta + p_2 \times \cos^2\theta$$

$$\frac{1}{\sigma_{b\bar{b}}} \frac{d\sigma_{b\bar{b}}}{d\cos\theta} = \frac{3}{8}(1 + \cos^2\theta) + (A_{FB}^b) \times \cos\theta$$

(ref : arXiv :2011.00530)

$$(A_{FB}^b)_{\text{corrigé}} = \frac{(A_{FB}^b)}{1 - C_{QCD}}$$

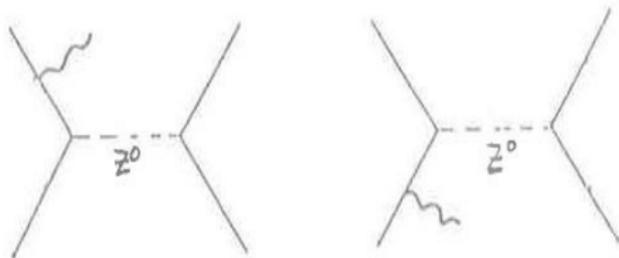
qui prend en compte :



$$C_{QCD} = 3.92 \pm 0.25\%$$

$$A_{FB}^{0,b} = A_{FB}^b + \delta A_{FB}^b$$

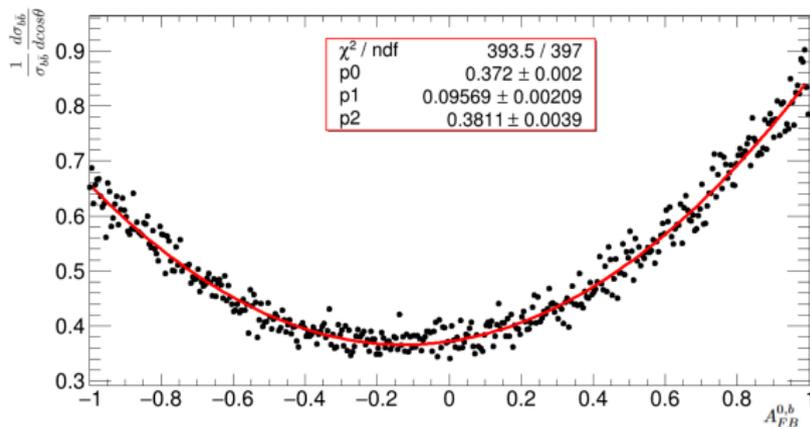
Pour prendre en compte :



$$\text{avec } \delta A_{FB}^b = 1.9\%$$

$$(A_{FB}^{0,b})_{\text{Avec BES}} = 0.0949 \pm 0.0021$$

# Analyse des données MC pour déduire $A_{FB}$ sans BES



- Correction différente car pas de BES

- $\delta A_{FB}^b = 3.3\%$

- $(A_{FB}^{0,b})_{Sans\ BES}^{MC} = 0.099 \pm 0.002$

(ref : arXiv :hep-ph/0411304v1)

Source	$\delta A_{FB}^c$	$\delta A_{FB}^b$	$\delta A_{FB}^s$
$\sqrt{s} = m_Z$	-0.0035	-0.0014	-0.0014
QED corrections	+0.0107	+0.0039	+0.0038
other	-0.0008	-0.0006	-0.0003
Total	+0.0064	+0.0019	+0.0021

$$(A_{FB}^{0,b})^{th} = 0.1030 \pm 0.0002$$

$$(A_{FB}^{0,b})_{corrigée}^{LEP} = 0.0996 \pm 0.0015$$

LEP/théorie : 2,26  $\sigma$

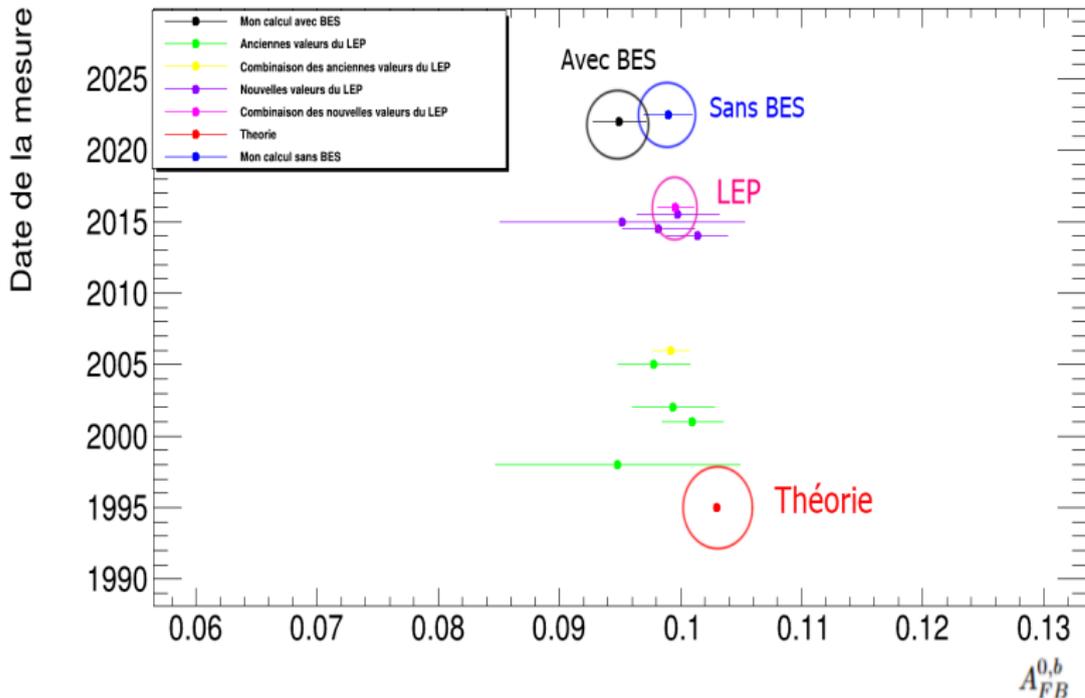
$$(A_{FB}^{0,b})_{th}^{FCC} \rightarrow \text{précision de 0,005\%}$$

$$(A_{FB}^{0,b})_{Avec BES}^{MC} = 0.09495 \pm 0.0021$$

$$(A_{FB}^{0,b})_{Sans BES}^{MC} = 0.099 \pm 0.002$$

(ref : arXiv :2011.00530)

# Résultats : Quelques comparaisons





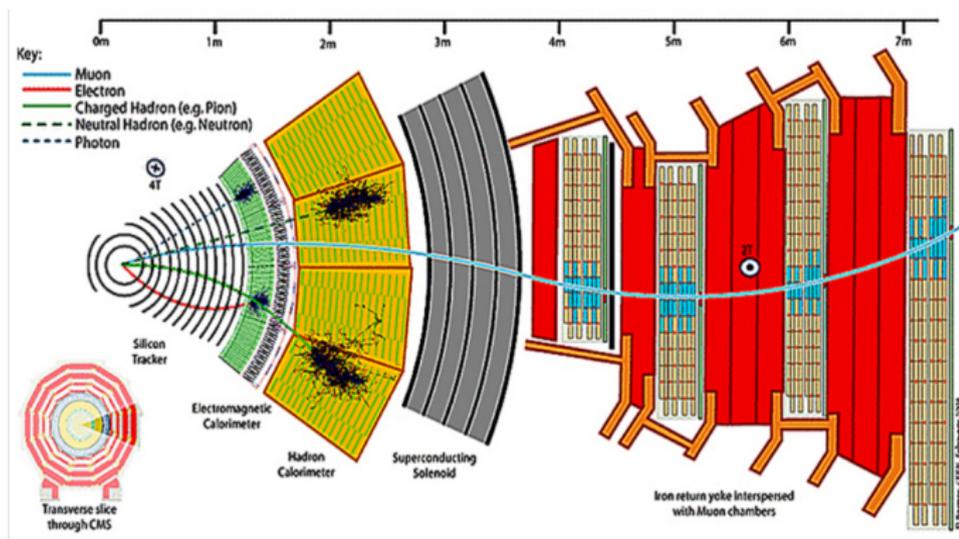
Trajectoire courbées avec champ magnétique pour mesurer :

- La charge : sens de rotation
- L'impulsion : rayon de courbure ( $R = \frac{mV}{qB}$ )

On peut aussi avoir l'énergie de la particule avec les calorimètres.

On peut trouver la masse d'une particule en connaissant l'énergie des constituants produits par exemple pour le boson Z :

$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{E_{e^-} + E_{e^+}}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$



Constituants d'un détecteur :

- Trajectographe
- Calorimètre électromagnétique
- Calorimètre hadronique
- Chambre a muons

# Identification de particules chargés

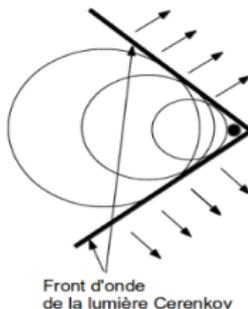
Pour détecter les particules on utilise deux méthodes :

- le rayonnement Tchérénkov
- le rayonnement de transition

Rayonnement de transition :

Lors de la traversé d'une particule entre deux matériaux de résistances électriques différentes, un rayonnement est émis  $\propto \frac{E}{mc^2}$

Rayonnement Tchérénkov :



Avec l'angle de la lumière émise on peut trouver la vitesse de la particule

# Identification de neutrinos

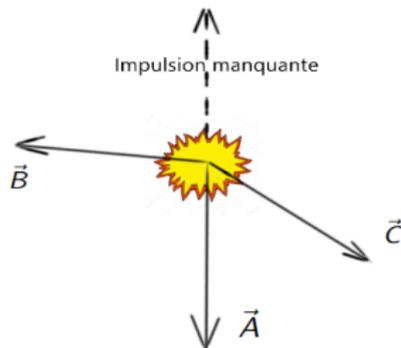
Faisceau selon Z  $\rightarrow$  pas d'impulsion transverse lors de la collision : Si l'impulsion transverse n'est pas conservée  $\rightarrow$  présence d'un neutrino.

$\vec{B}$   $\vec{C}$



Pour une particule :

$$\vec{p}_{\text{neutrino}} = -\vec{p}_A$$

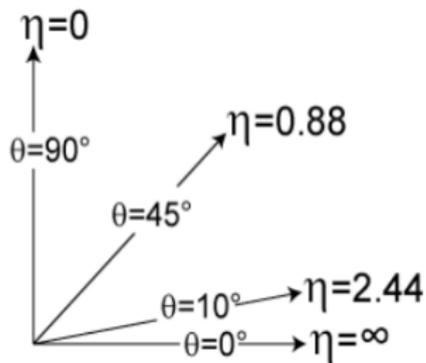
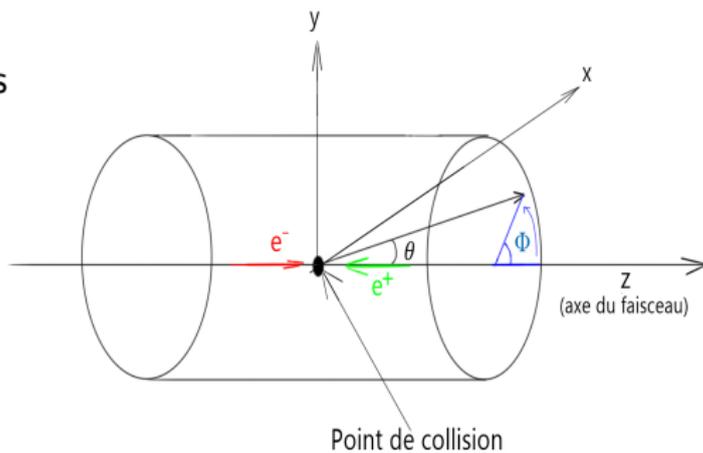


Pour plusieurs particules :

$$-\vec{p}_{\text{neutrino}} = \vec{p}_A + \vec{p}_B + \vec{p}_C$$

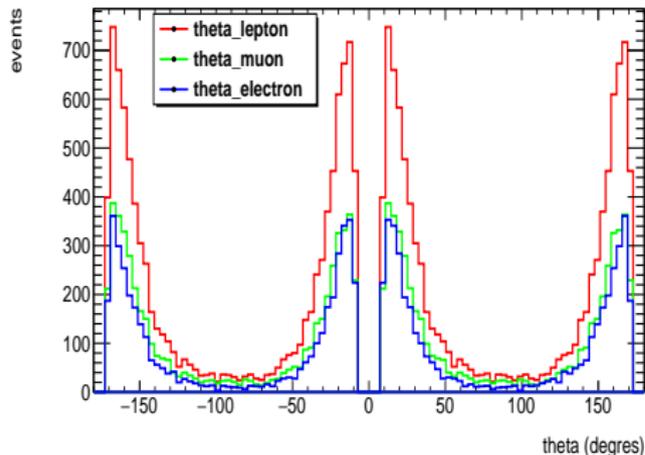
# Repères et paramètres cinématiques en physique des particules

- On repère la position des particules par l'angle  $\eta$  plutôt que l'angle  $\theta$  entre les quarks et l'axe du faisceau



On définit la pseudo-rapidité :  
$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$
  
et l'angle azimutal  $\phi$

# Exploration des loi cinématiques des événements



- On trace la direction des leptons dans l'espace
- Leptons envoyés à l'avant et à l'arrière

- Selon l'angle  $\phi$ , le nombre d'évènements est le même partout
- Les leptons proviennent des jets de quarks et font un cône dans l'espace

