



# Les tests du modèle standard et la physique du quark top



**Frédéric Déliot**  
CEA-Saclay

**22<sup>ème</sup> congrès de la SFP, 1<sup>er</sup> juillet 2013**

# Le modèle standard

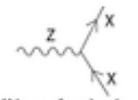
Le MS comporte 12 particules de matière (+12 d'antimatière) classés en 3 familles et 3 forces.

Il décrit **tous** les phénomènes observés en physique des particules.

Sa construction est basée sur la notion de **symétrie**:  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ .

- Le lagrangien du modèle standard (symétrie électrofaible):

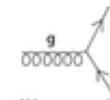
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\ & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\ & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\ & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\ & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\ & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\ & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta \end{aligned}$$



X is any fermion in the Standard Model.



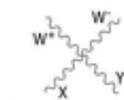
X is electrically charged.



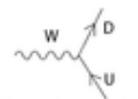
X is any quark.



is a photon or Z-boson.



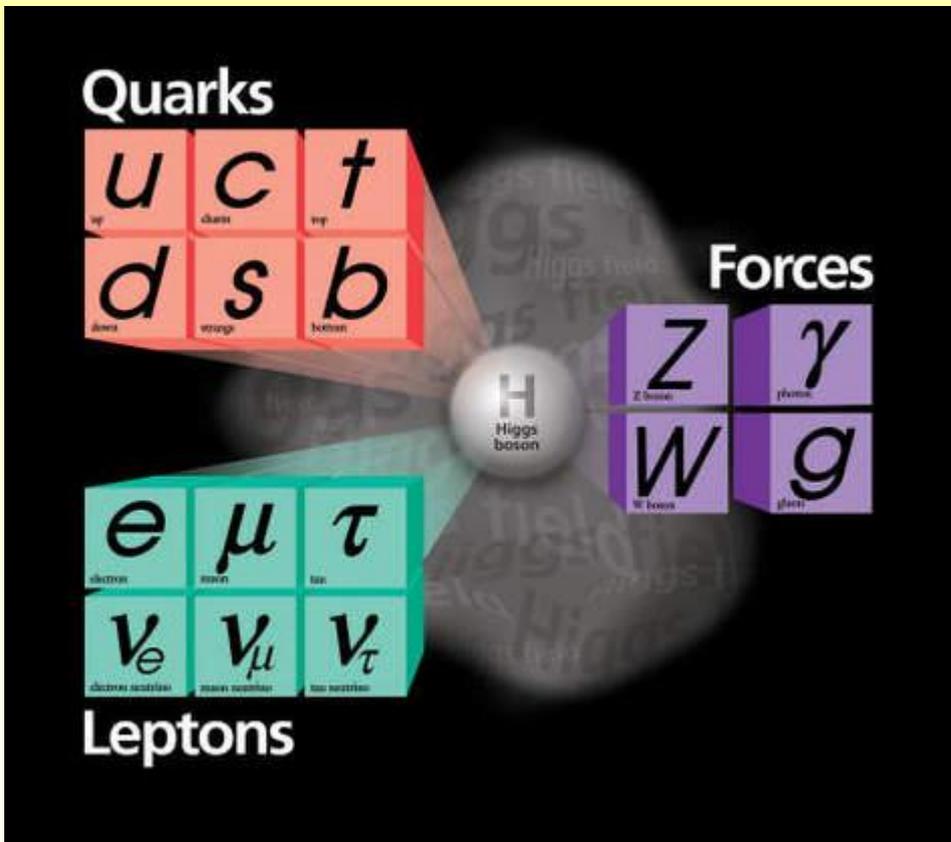
X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.



U is a up-type quark; D is a down-type quark.

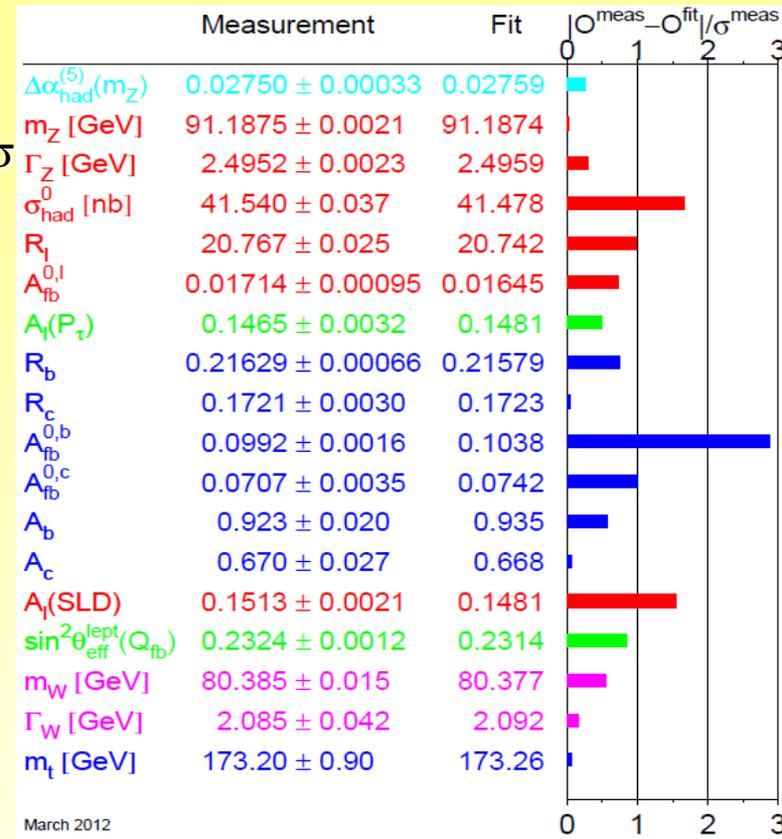


L is a lepton and nu is the corresponding neutrino.

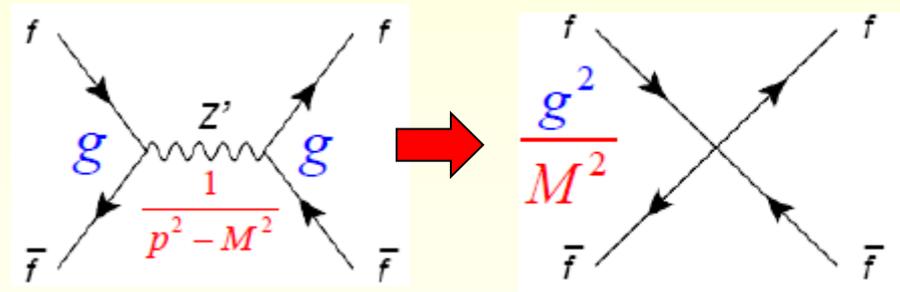


# Les succès du modèle standard

- Les mesures de précision électrofaible
  - en accord avec les prédictions à mieux que 3  $\sigma$
- Limitations du modèle
  - Nombre de paramètres libres
  - Nombre de familles de particule
  - Matière noire ?
  - Gravitation
  - Ajustement fin des paramètres, Problèmes de hiérarchie
- Mesure de précision des paramètres du modèle

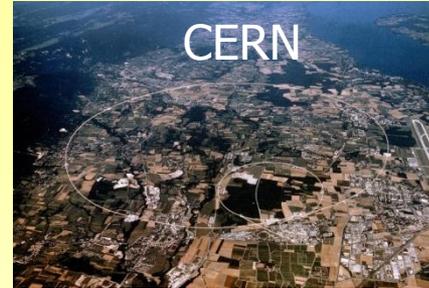


- Piste pour modèles au delà du MS
- Complémentaires avec les mesures directes de nouvelle physique



# Tests du modèle standard

- Depuis la découverte des bosons W et Z (1983)
  - Plusieurs décennies de test à des énergies de plus en plus grandes



LEP ( $e^+e^-$ , 1989-2000)



Tevatron ( $p\bar{p}$ , 1986-2011)



LHC ( $pp$ , 2008-)



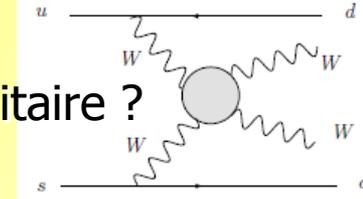
F. Déliot, SFP Marseille, 1<sup>er</sup> juillet 2013

# La physique électrofaible: la production de diboson

# Production de diboson

- Section efficace de diffusion WW

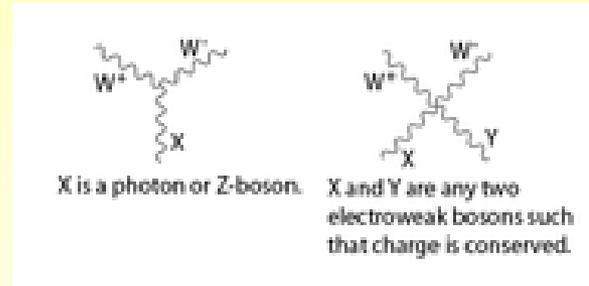
- Diverge sans boson de Higgs
- Est-ce que le boson de Higgs rend bien cette section efficace unitaire ?



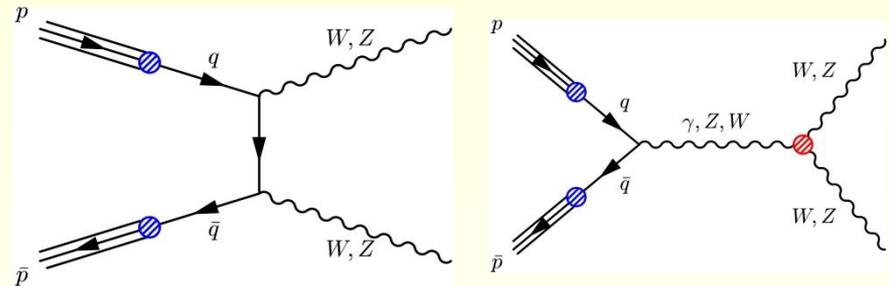
- Couplages trilineaire/quartique de boson de jauge

- Test la nature non-abélienne du modèle standard
- groupe de symétrie pour l'électromagnétisme: U(1) commutatif
- groupe de symétrie de l'interaction faible: SU(2) non commutatif
- Sensible à la nouvelle physique

**3-gauge couplings: SM**  $W^+W^-\gamma$   $W^+W^-Z$   
**anomalous**  $Z\gamma\gamma$ ,  $ZZ\gamma$ ,  $ZZZ$



**4-gauge couplings: SM**  $W^+W^-\gamma\gamma$ ,  $W^+W^-\gamma Z$ ,  
 $W^+W^-ZZ$ ,  $W^+W^-W^+W^-$   
**anomalous**  $ZZ\gamma\gamma$

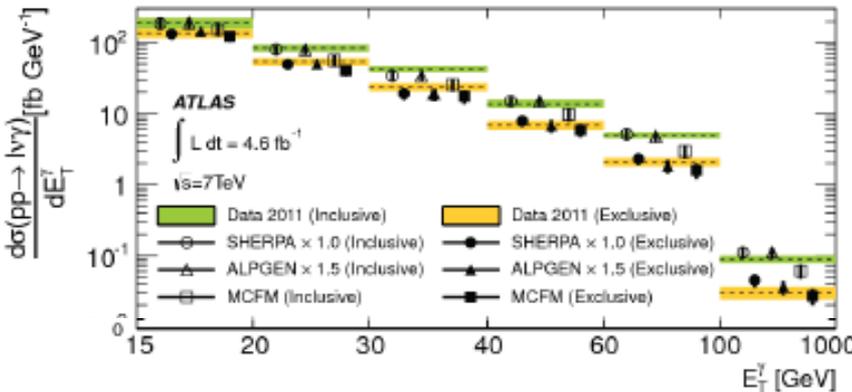
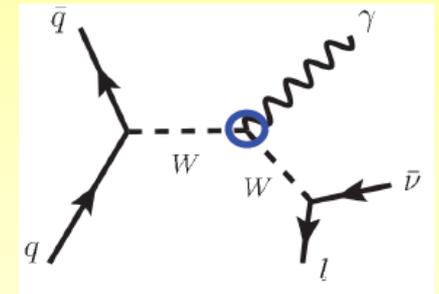
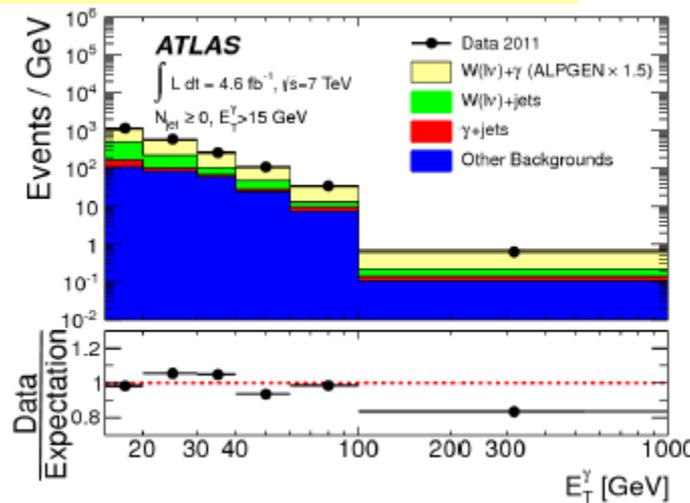
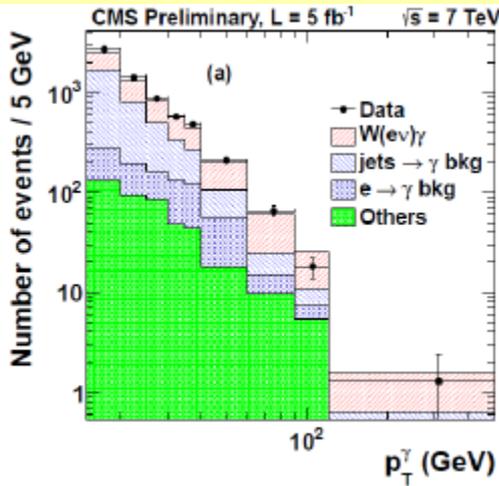


# Production de $W+\gamma$

- test du moment magnétique dipôle et électrique quadripolaire du W
  - Etat final avec un lepton, un photon et de l'énergie manquante

3-gauge couplings: SM  $W^+W^-\gamma$   $W^+W^-Z$   
 anomalous  $Z\gamma\gamma$ ,  $ZZ\gamma$ ,  $ZZZ$

4-gauge couplings: SM  $W^+W^-\gamma\gamma$ ,  $W^+W^-\gamma Z$ ,  
 $W^+W^-ZZ$ ,  $W^+W^-W^+W^-$   
 anomalous  $ZZ\gamma\gamma$

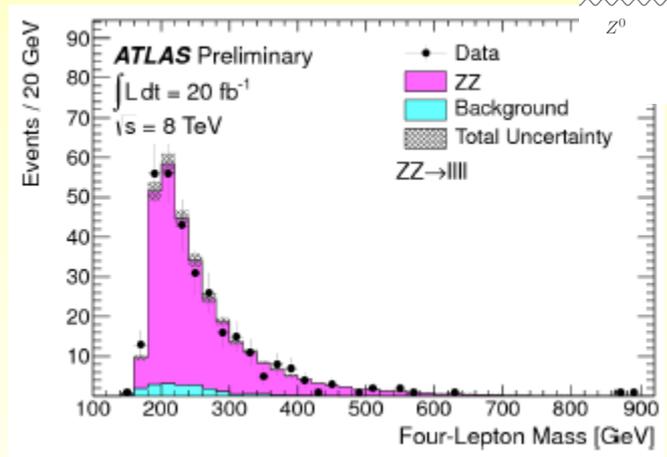
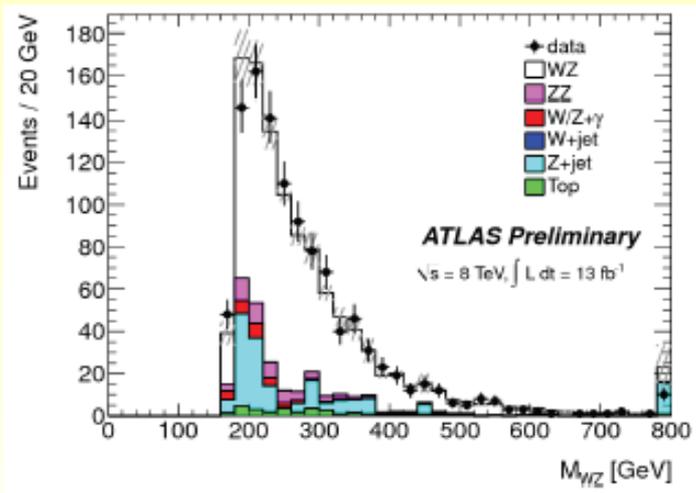
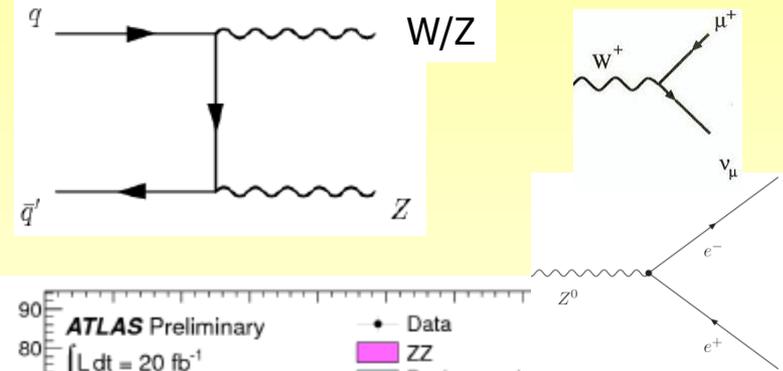
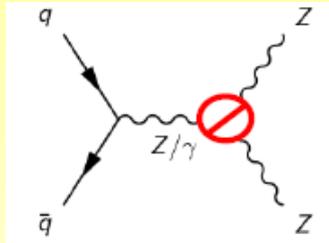
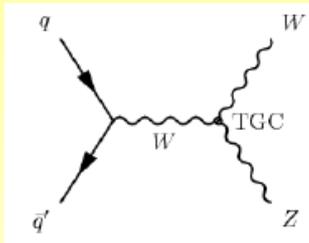


Challenge pour les modèles (Monte Carlo)

# Production de dibosons lourds

- taux de production plus faible que  $W/Z+\gamma$
- $WW$  et  $ZZ$  sont des bruits de fond important pour les signaux de Higgs

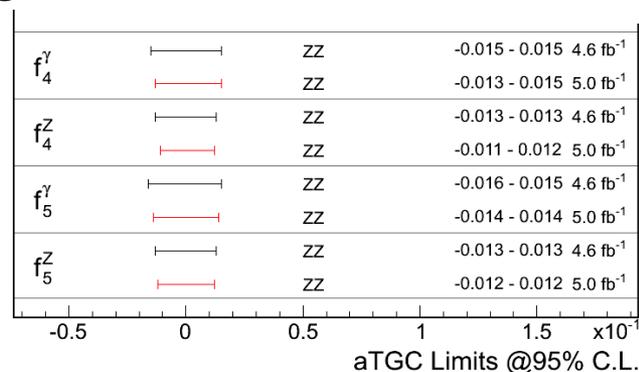
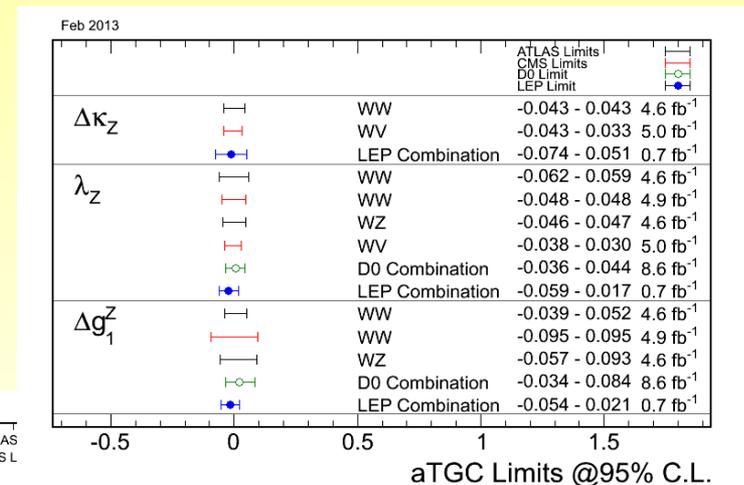
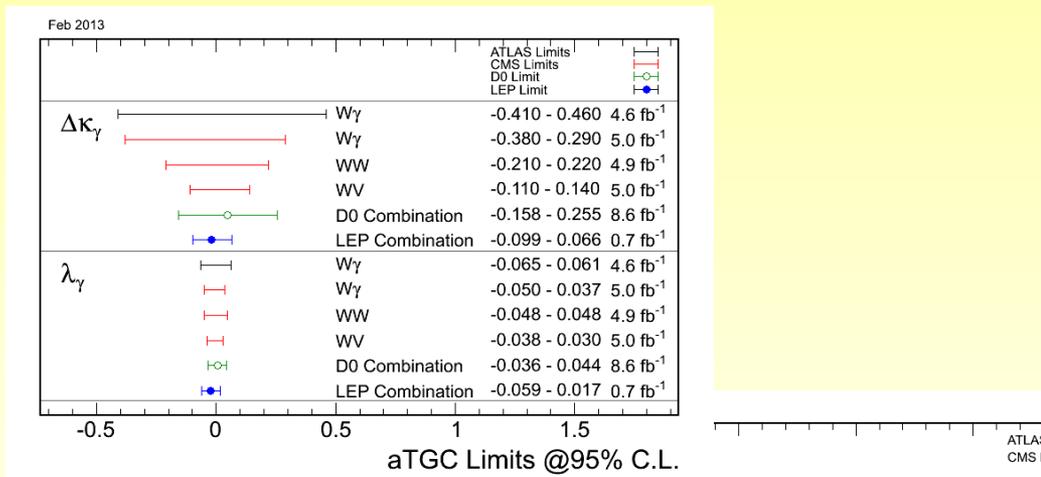
3-gauge couplings: SM	$W^+W^-\gamma$	$W^+W^-Z$
anomalous	$Z\gamma\gamma$ , $ZZ\gamma$ , $ZZZ$	
4-gauge couplings: SM	$W^+W^-\gamma\gamma$ , $W^+W^-\gamma Z$ , $W^+W^-ZZ$ , $W^+W^-W^+W^-$	
anomalous	$ZZ\gamma\gamma$	



Mesures en accord avec les prédictions

# Conclusion sur la production de diboson

- les mesures sont en accord avec les prédictions du modèle standard
  - Test des couplages à l'échelle du TeV
  - Test de la présence éventuelle de nouvelles physiques
  - Les recherches vont se poursuivre à une nouvelle échelle avec les données du LHC à 13 TeV



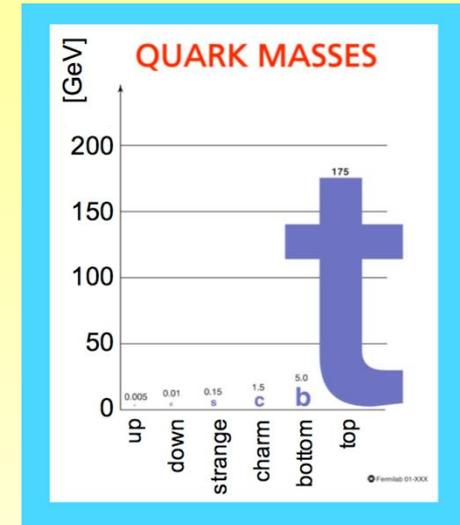
# La physique du quark top l'asymétrie de charge top-antitop

# Le quark top: un quark spécial

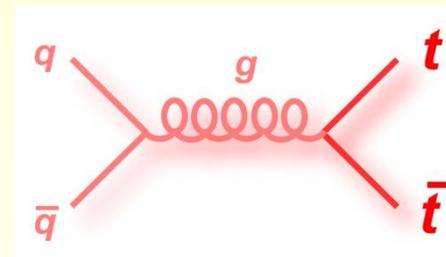
- la particule élémentaire la plus lourde
  - Un rôle spécial dans la théorie ?
  - Un fenêtre privilégiée vers la nouvelle physique ?
  - \* Couplage de Yukawa au boson de Higgs  $\sim 1$
  - \* Se désintègre avant de s'hadroniser

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -\lambda_t \overline{\psi_{Lt}} \Phi \psi_{Rt}$$

$\lambda_t \approx 1 !!$   
 $m_t \gg m_b$   
 $\tau \approx 5.10^{-25} \text{s} \ll \Lambda_{\text{QCD}}^{-1}$

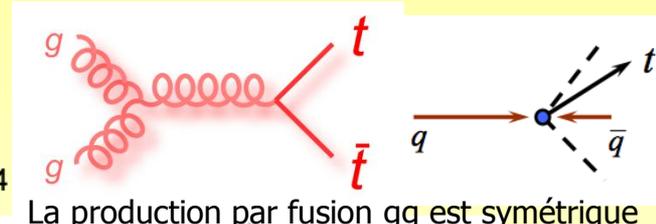
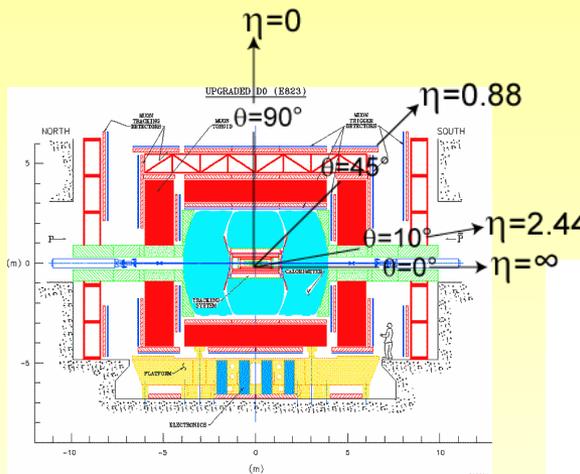
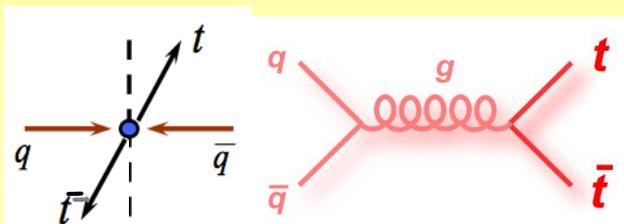


- du Tevatron au LHC
  - Découvert au Tevatron en 1995
  - Le LHC est une usine à top

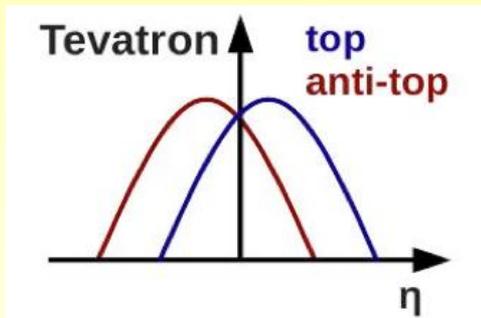


# L'asymétrie de charge top-antitop

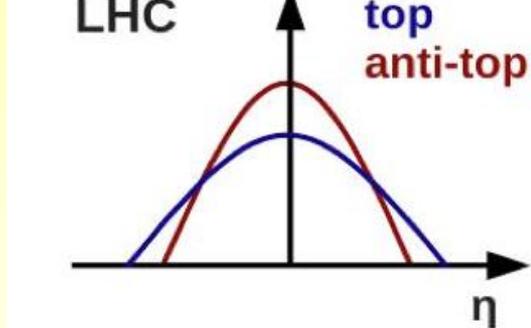
- La théorie de l'interaction forte (QCD) prédit une asymétrie dans la production de paire top-antitop par annihilation quark-antiquark
  - le top est émis préférentiellement dans la direction du quark incident



La production par fusion gg est symétrique



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



$$A_{FB}^{t\bar{t}} = \frac{N(\Delta y > 0) - N(\Delta y < 0)}{N(\Delta y > 0) + N(\Delta y < 0)}$$

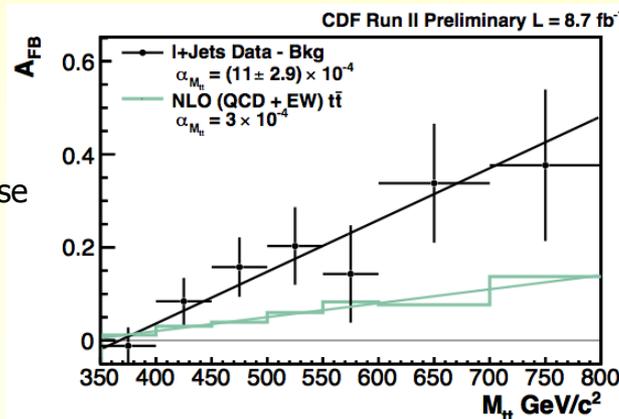
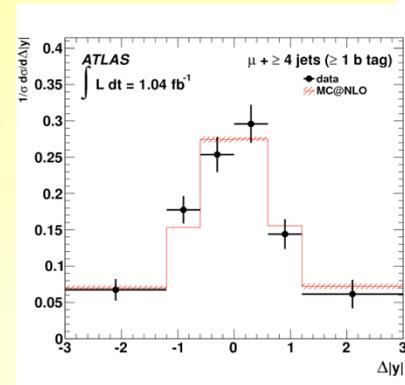
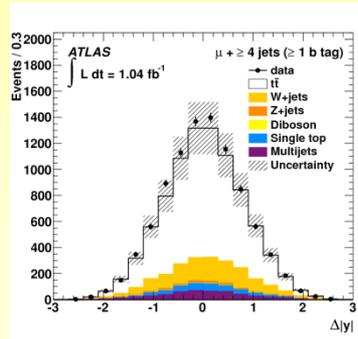
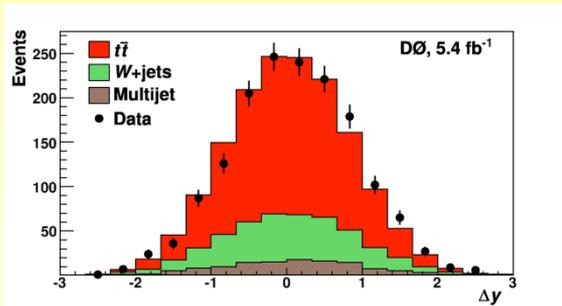
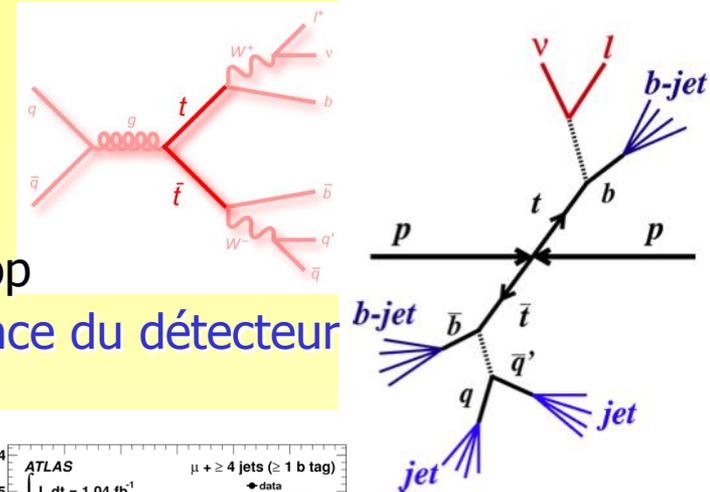
$$\Delta y = y_t - y_{\bar{t}}$$

$$A_c = \frac{N(\Delta |y| > 0) - N(\Delta |y| < 0)}{N(\Delta |y| > 0) + N(\Delta |y| < 0)}$$

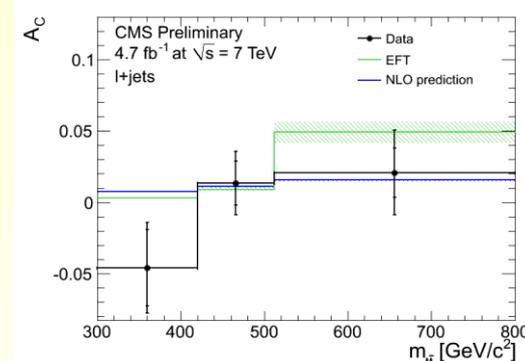
$$\Delta |Y| = |Y_t| - |Y_{\bar{t}}|$$

# Les mesures de l'asymétrie ttbar

- sélection des évènements ttbar
  - Canal lepton+jets ou dilepton
- reconstruction de l'impulsion des tops
  - différence entre la direction du top et de l'antitop
- correction des effets de reconstruction et d'acceptance du détecteur
- mesure inclusive ou différentielle

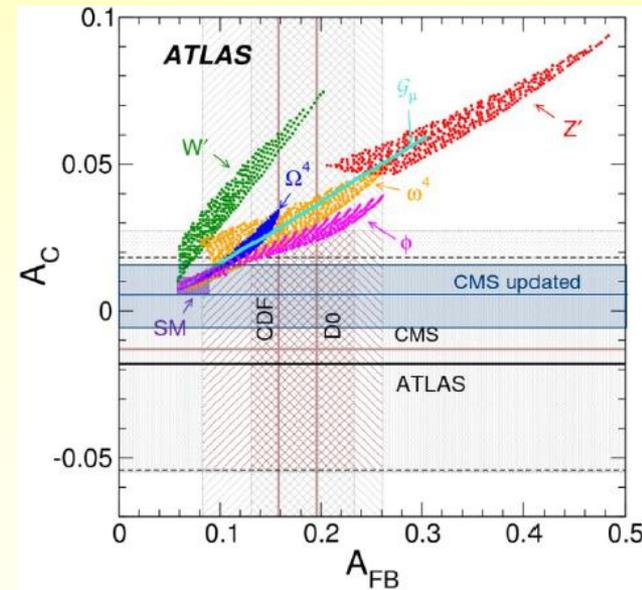
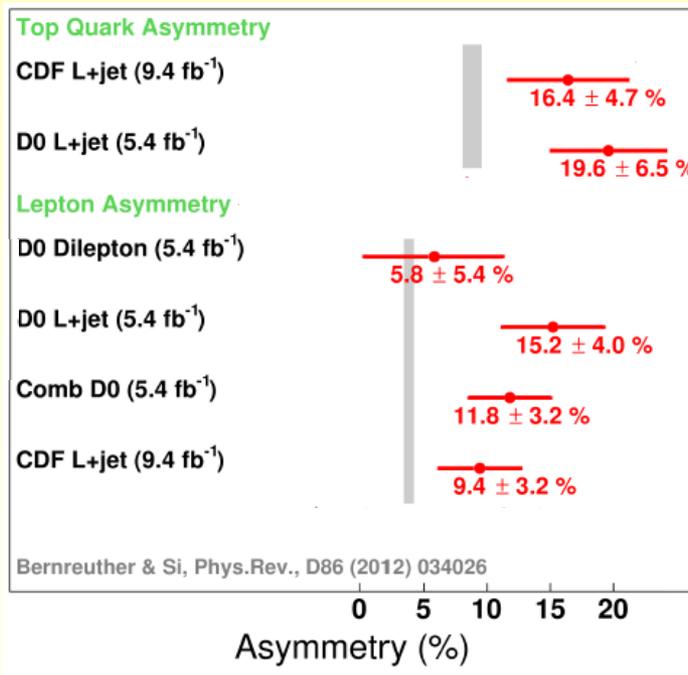
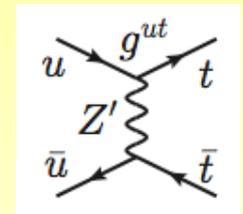
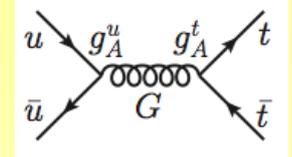


Mesures différentielle en fonction de la masse invariante ttbar



# Conclusion sur les mesures d'asymétrie ttbar

- des mesures au Tevatron (CDF) montrent un excès par rapport aux prédictions
  - non confirmé par d'autres expériences pour le moment
- mesures au Tevatron et au LHC complémentaires
  - asymétrie attendue plus faible au LHC
- nouvelle physique ou défaut dans la prédiction QCD ?
  - les progrès théoriques et expérimentaux trancheront bientôt



# Cohérence du modèle

- Prédiction indirecte de la masse du boson de Higgs
  - Par la mesure précise de la masse du boson W et du quark top
- Comparaison avec la mesure directe de la masse du Higgs

