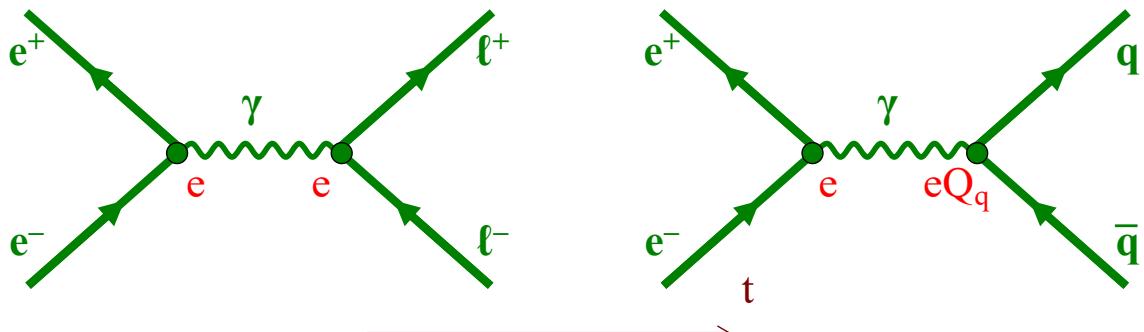


Production de fermions par e^+e^-

- Processus de QED



ℓ = lepton chargé (e, μ, τ)

q = quark (d, u, s, c, b, t)

$$A \propto e \cdot e = e^2$$

$$A \propto e \cdot e Q_q = e^2 Q_q$$

$$\sigma = |A|^2 \propto e^4 \propto \alpha^2$$

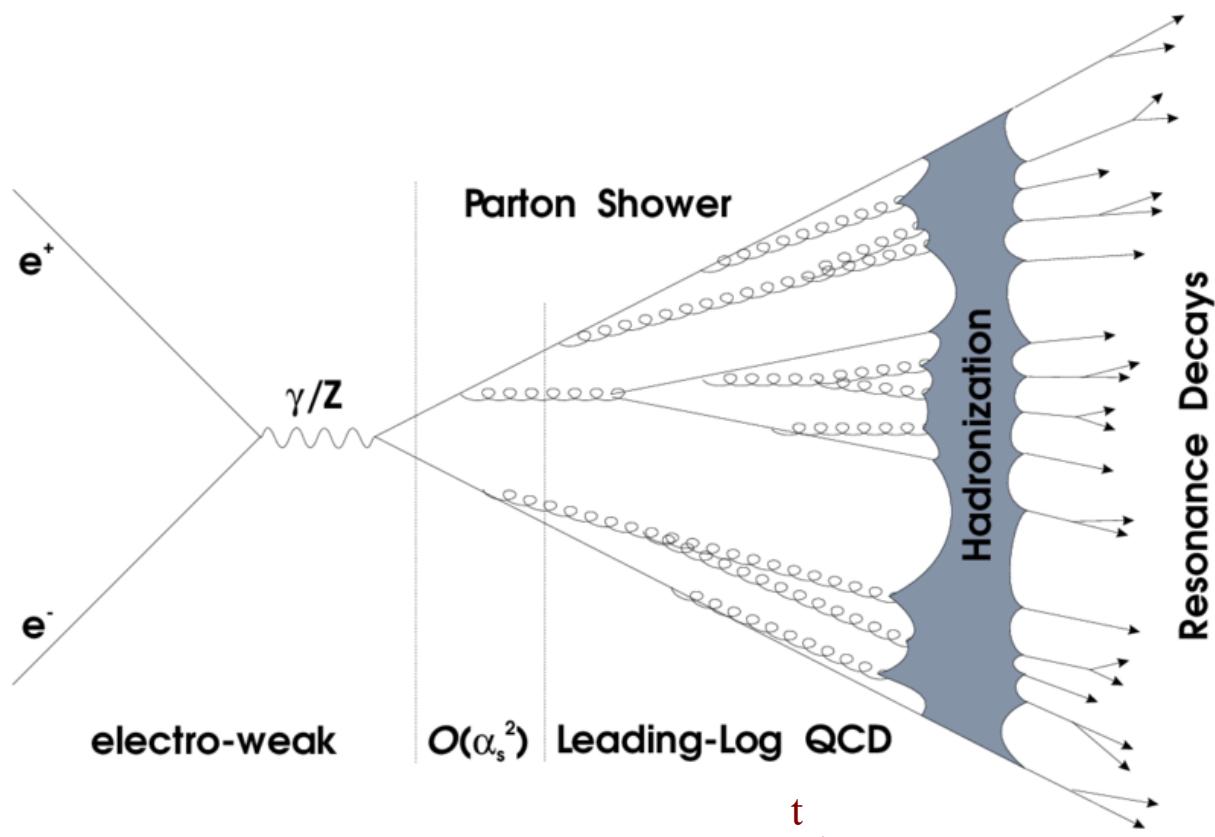
$$\sigma = |A|^2 \propto e^4 Q_q^2 \propto \alpha^2 Q_q^2$$

Q_q = charge du quark q
 $= -1/3$ (d, s, b) ou $+2/3$ (u, c, t)

233

OS, 28 mai 2025

$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$



OS, 28 mai 2025

234

$$R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

- On définit

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sum_q \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum_q Q_q^2$$

où on doit sommer sur tous les quarks pouvant être produits à l'énergie \sqrt{s} de la collision:

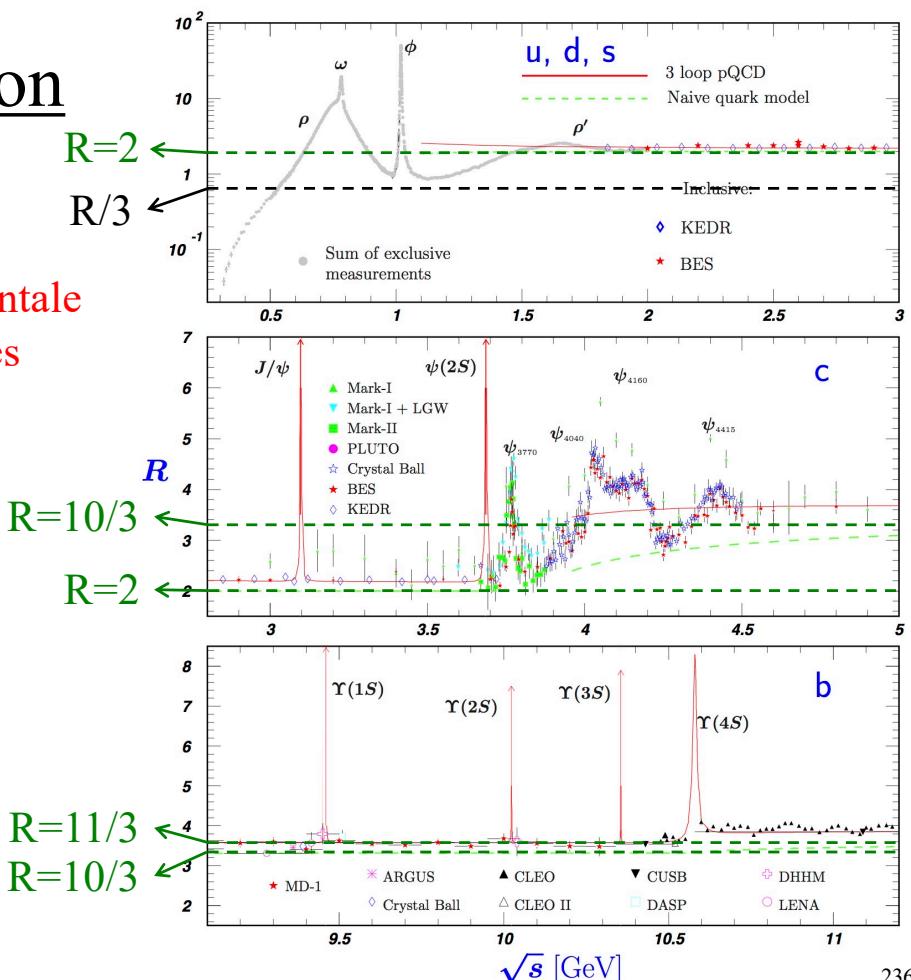
- si $\sqrt{s} < \sim 3$ GeV (J/ψ), on produit $d, u, s \rightarrow R = (1/3)^2 + (2/3)^2 + (1/3)^2 = 6/9$
- si $3 < \sqrt{s} < \sim 10$ GeV (Υ), on produit $d, u, s, c \rightarrow R = \dots = 10/9$
- si $\sqrt{s} > \sim 10$ GeV, on produit $d, u, s, c, b: \rightarrow R = \dots = 11/9$



- Il faut tenir compte des couleurs des quarks, c'est-à-dire multiplier R par le nombre de couleurs (N_c)
 - pour $N_c = 3$, on prédit donc $R = 2, 10/3, 11/3$ en fonction de \sqrt{s}

R en fonction de \sqrt{s}

→ preuve expérimentale de l'existence des (trois) couleurs



Quark top

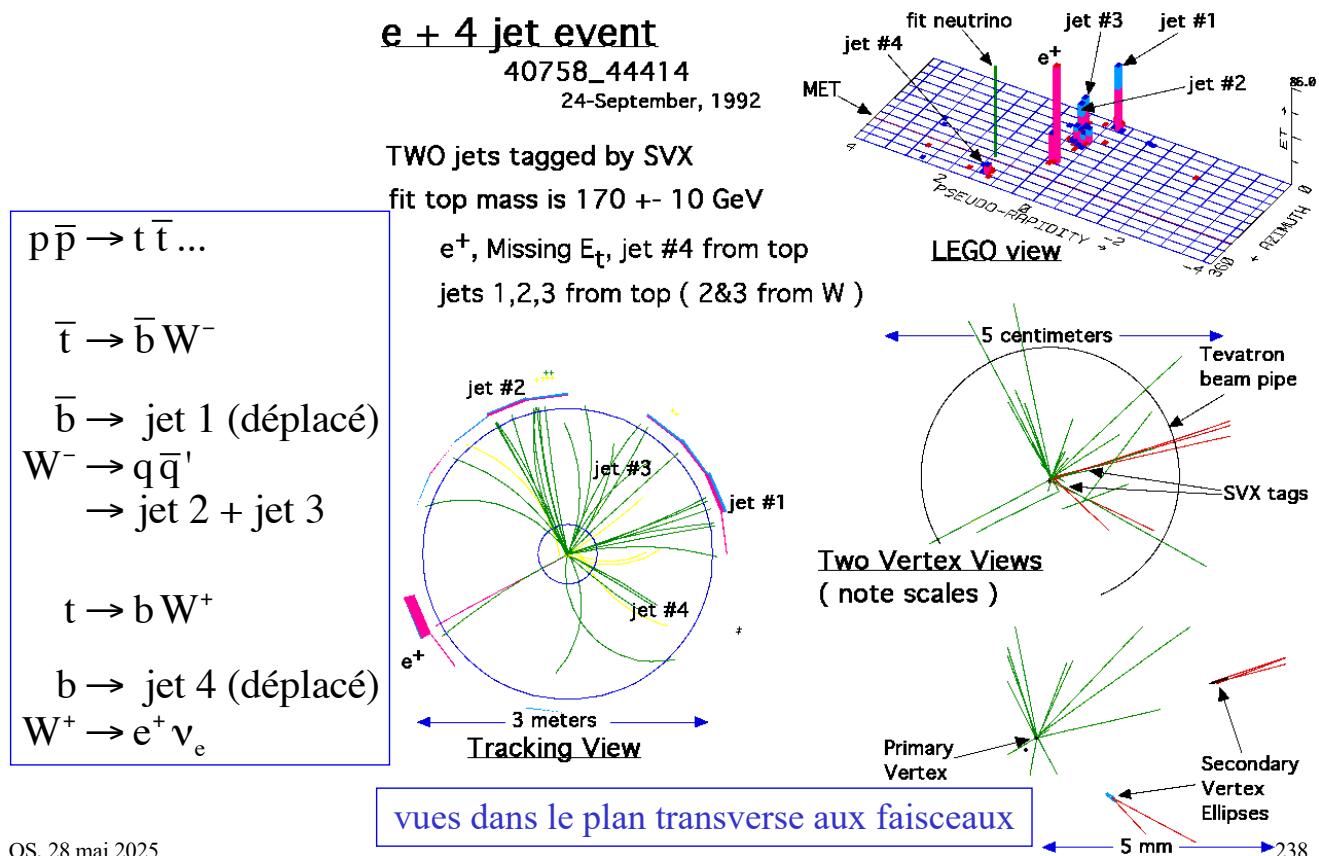
- Découvert en 1995 au Tevatron ($p\bar{p}$ à $\sqrt{s} = 1.8$ TeV) à Fermilab par les collaborations CDF et D0
- La plus massive des particules élémentaires connues: $m_t = 172.57 \pm 0.29$ GeV/c²
- Le quark t se désintègre avant d'avoir eu le temps de s'hadroniser (de se lier à d'autres quarks)
 - pas de hadron contenant le quark top
- Comme $m_t > m_W$, on a

$$\begin{aligned} t &\rightarrow W^+ b \\ \bar{t} &\rightarrow W^- \bar{b} \end{aligned}$$

désintégration par interaction faible

- Nombre quantique q_t , conservé par interactions forte et électromagnétique, mais violé par l'interaction faible

Premier candidat top vu par CDF en 1992



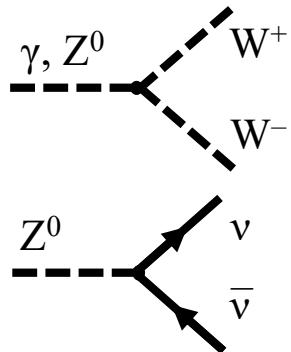
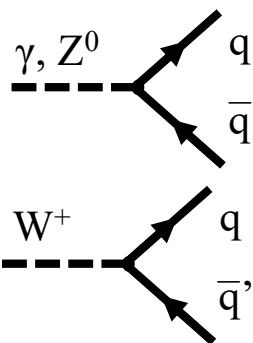
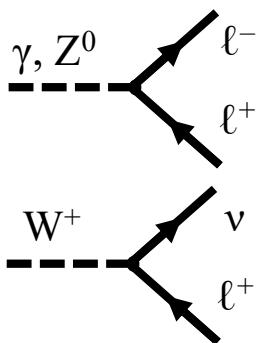
Théorie électrofaible

- 4 bosons d'échange: γ, Z^0, W^+, W^-
 - le mécanisme de Higgs (= brisure spontanée de la symétrie de jauge locale) engendre une masse pour les Z et W :
 - $m_{Z^0} = 93.8 \pm 2.5 \text{ GeV}/c^2$
 - $m_{W^\pm} = 83.0 \pm 3.0 \text{ GeV}/c^2$

Maxwell: ~ 1864
unification des forces électrique et magnétique

Glashow, Salam, Weinberg: 1961–1968
unification des forces électromagnétique et faible

- Couplages:



+ couplages quartiques

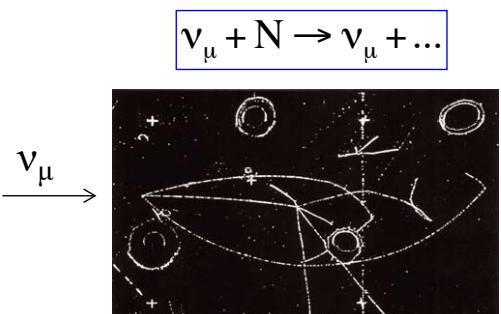
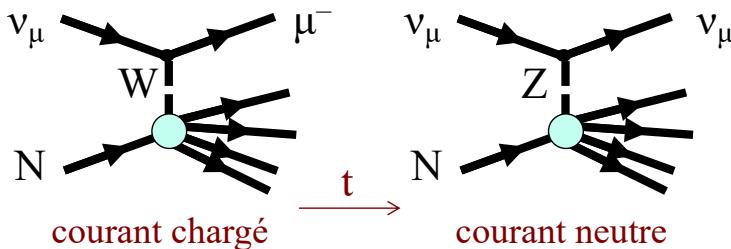
WWWW
WWZZ
WWZ γ
WW $\gamma\gamma$

OS, 28 mai 2025

239

Découvertes des bosons vecteurs W et Z

- 1973: découverte des courants neutres au CERN (chambre à bulles Gargamelle)



- 1979: Prix Nobel à Glashow, Weinberg et Salam
- 1983: découverte des W et Z réels au supersynchrotron à protons du CERN ($\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$)

$$\begin{array}{ll} p + \bar{p} \rightarrow W^\pm + \dots & m_W \approx 80 \text{ GeV} / c^2 \\ p + \bar{p} \rightarrow Z^0 + \dots & m_Z \approx 91 \text{ GeV} / c^2 \end{array}$$

Rubbia et al. (UA1)
Darriulat et al. (UA2)

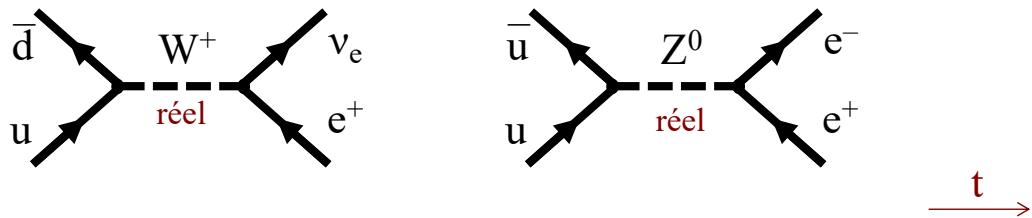
- 1984: prix Nobel à Rubbia et Van der Meer

OS, 28 mai 2025

240

Production de W et Z réels

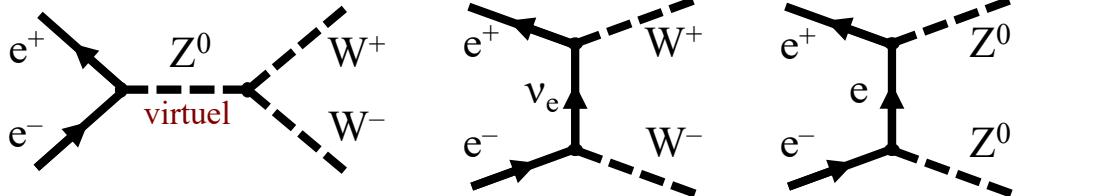
- Dans les collisions $p\bar{p}$ au SPS (1983–), puis Tevatron ...



- Dans les collisions e^+e^- au LEP

– 1989–1995: $\sqrt{s} \sim m_Z c^2$

– 1995–2000: $\sqrt{s} > 2m_Z c^2$



Nombre de neutrinos

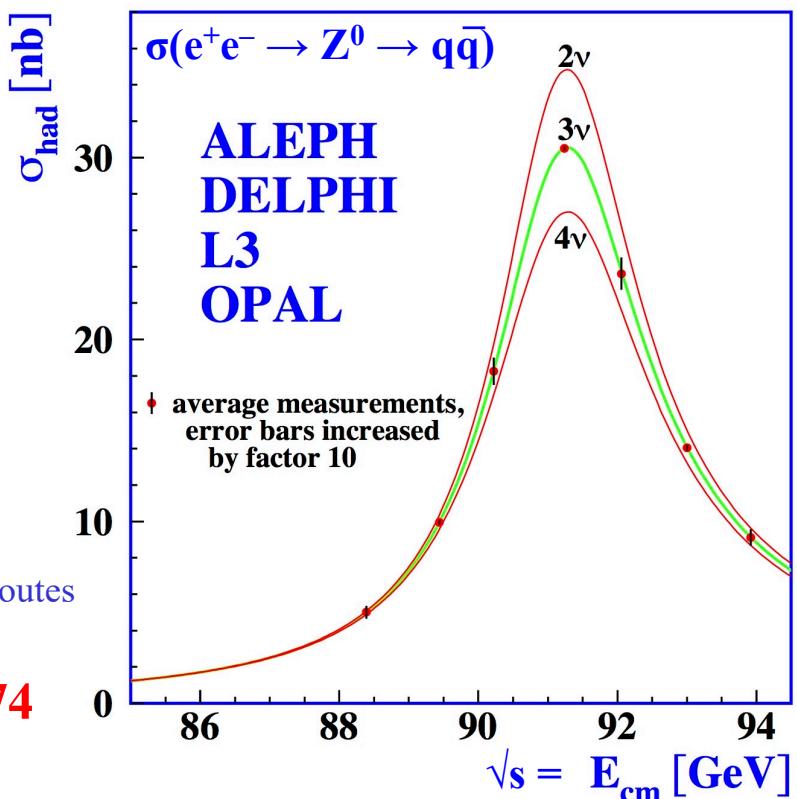
- N_v = nombre de types de neutrinos légers ($m_v < m_Z/2$) ayant un couplage avec le Z^0

$$\Gamma_{\text{inv}} = \Gamma_Z - \Gamma_{\text{had}} - 3 \Gamma_{\ell^+\ell^-}$$

$$N_v = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{\ell^+\ell^-}} \left(\frac{\Gamma_{\ell^+\ell^-}}{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}} \right)_{\text{MS}}$$

– détermination à partir de toutes les données du LEP:

$$N_v = 2.9963 \pm 0.0074$$



chambre à projection temporelle

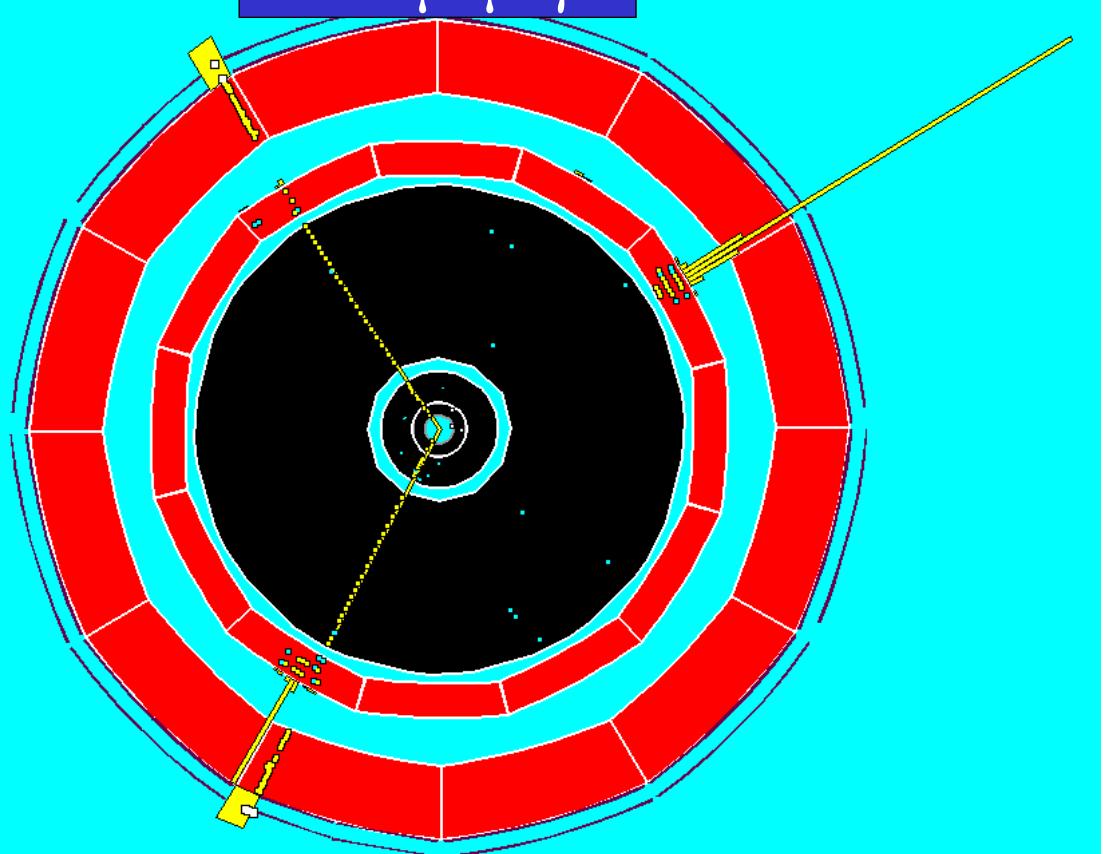
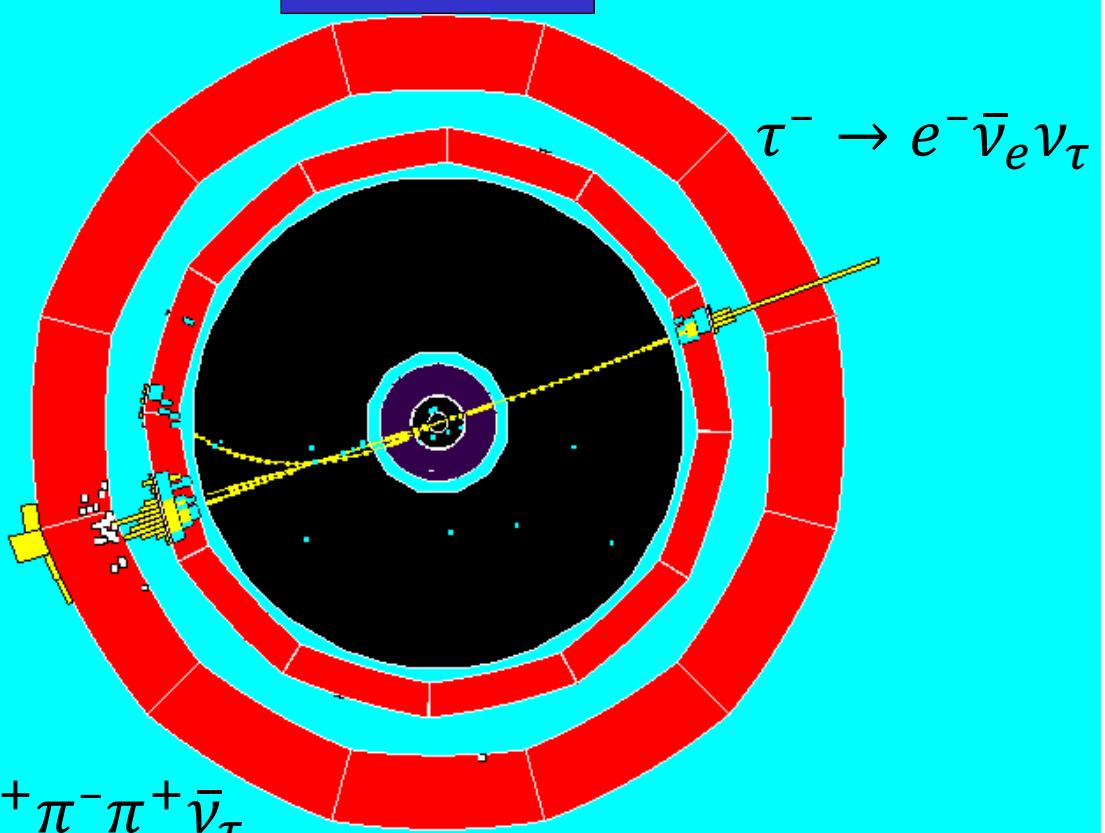
chambres à muons

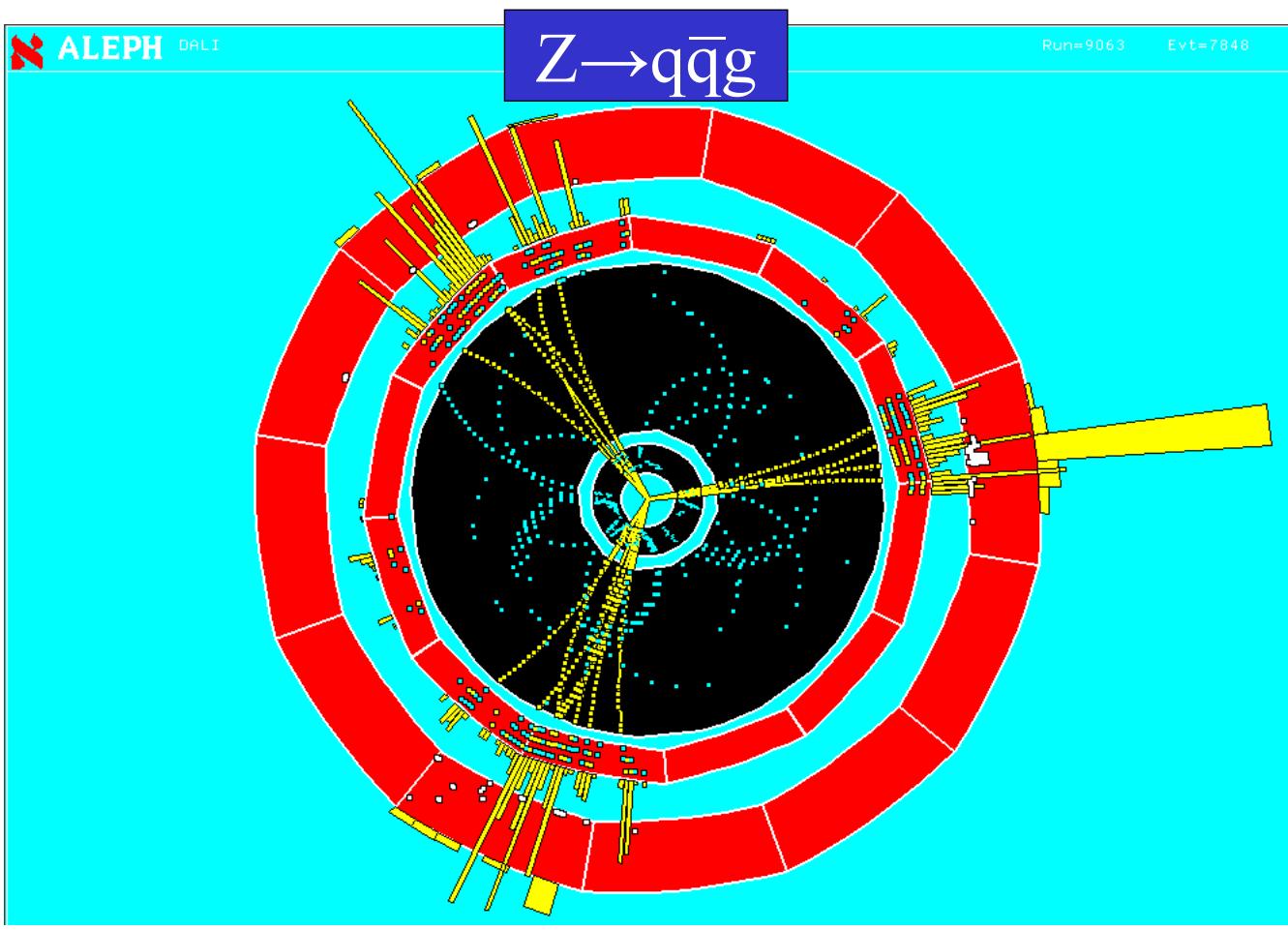
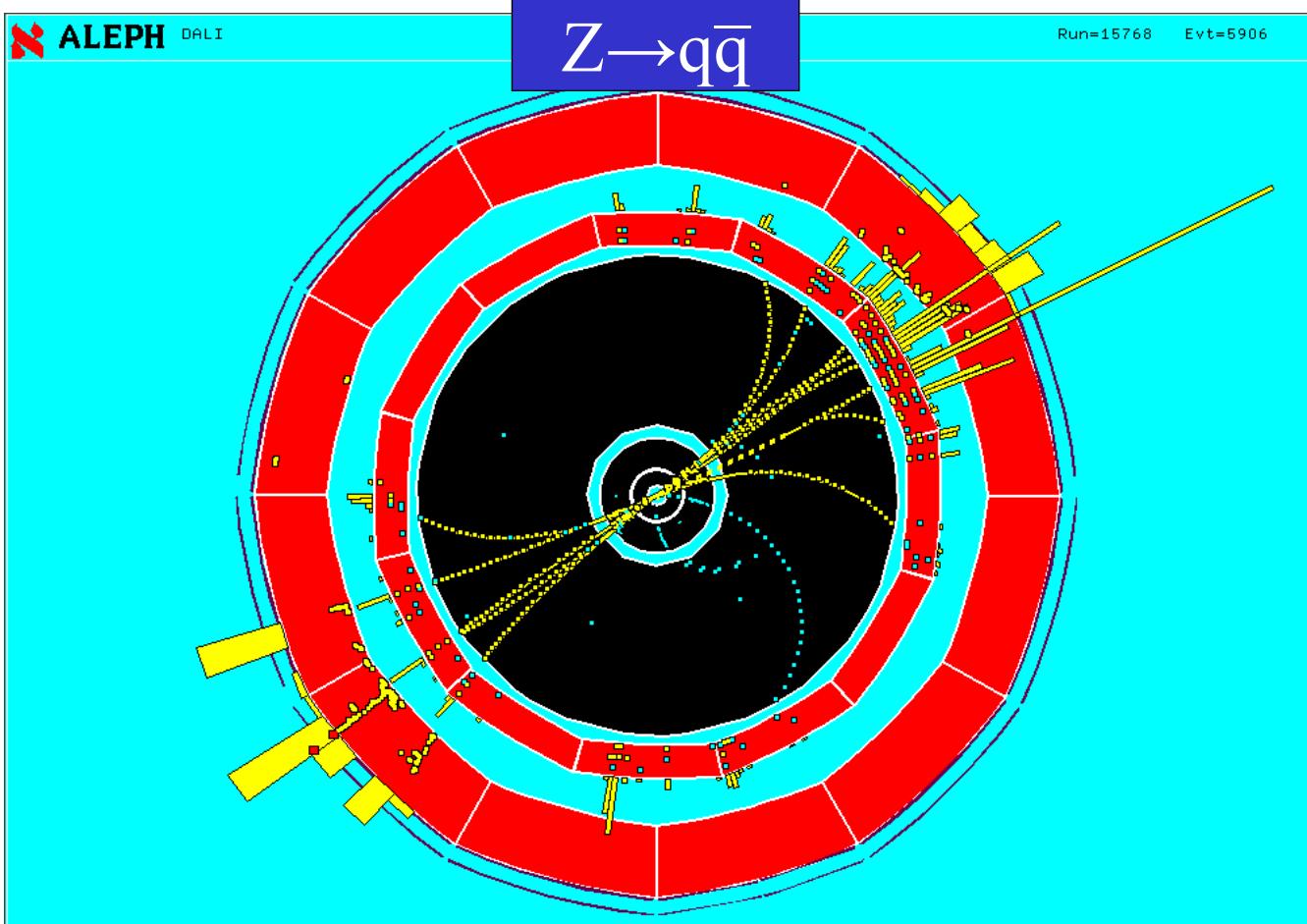
muon

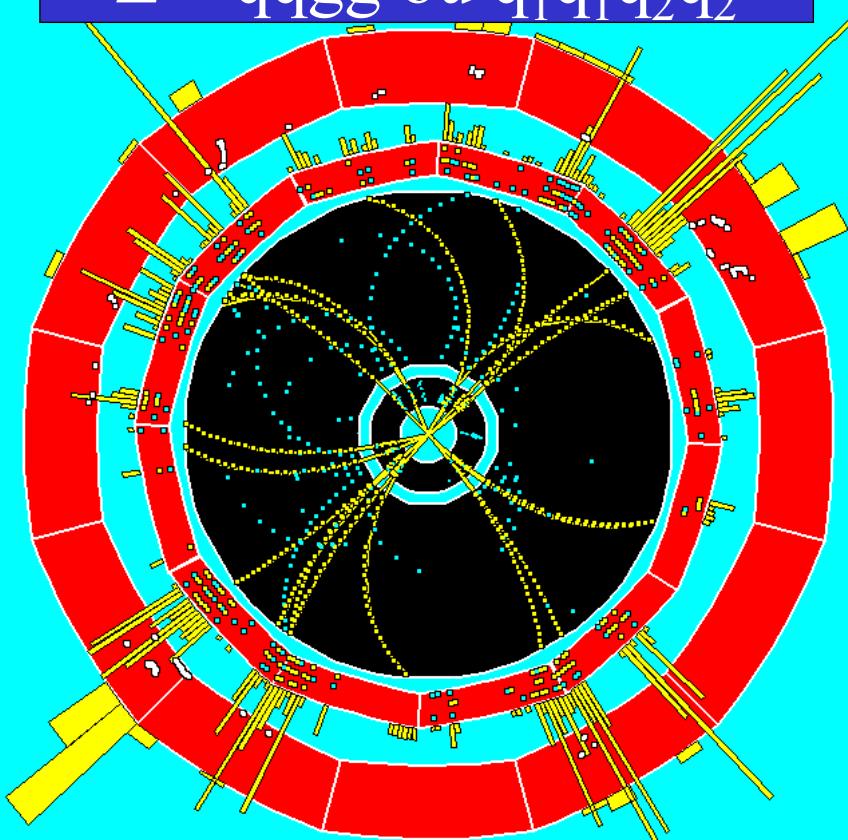
particule chargée

calorimètre électro-magnétique

calorimètre hadronique



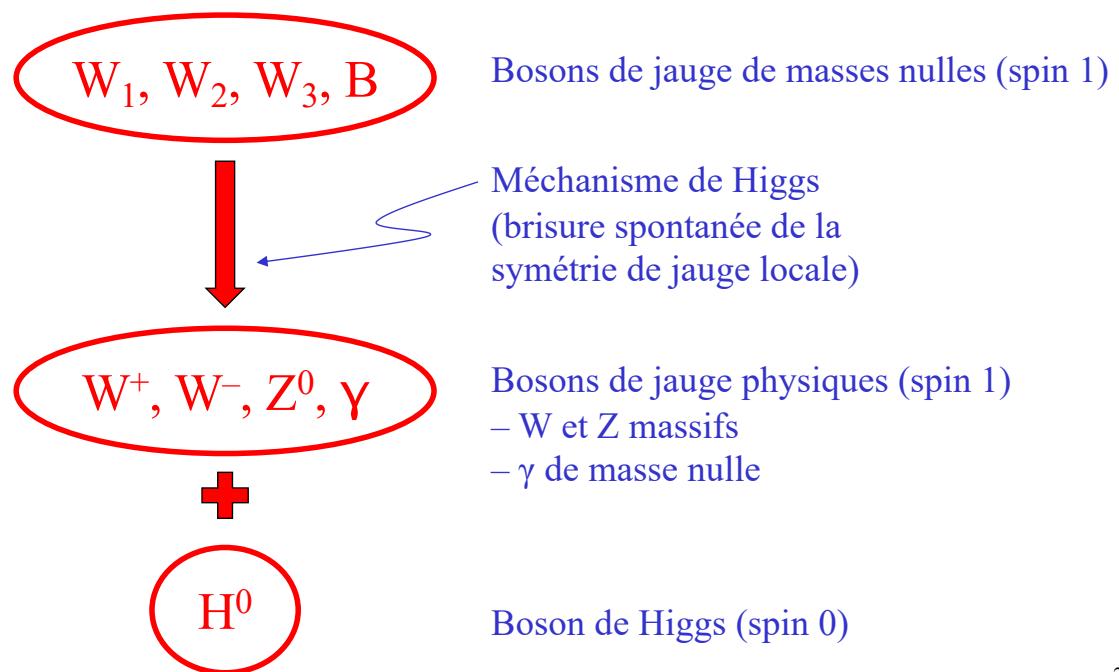




Théorie électrofaible

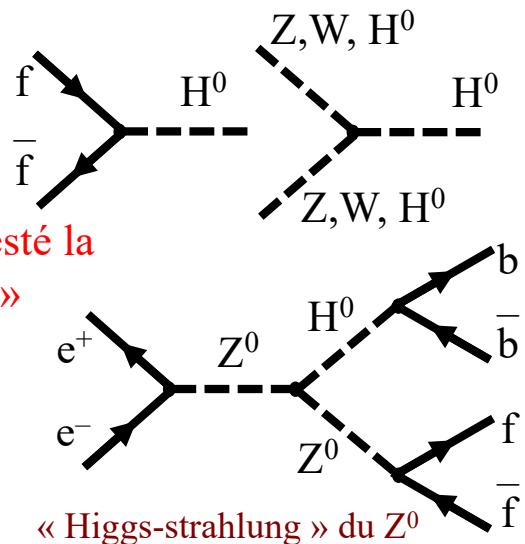
- Théorie quantique des champs avec invariance de jauge locale

Unification des forces électromagnétique et nucléaire faible (Glashow, Weinberg, Salam)



Boson de Higgs H^0

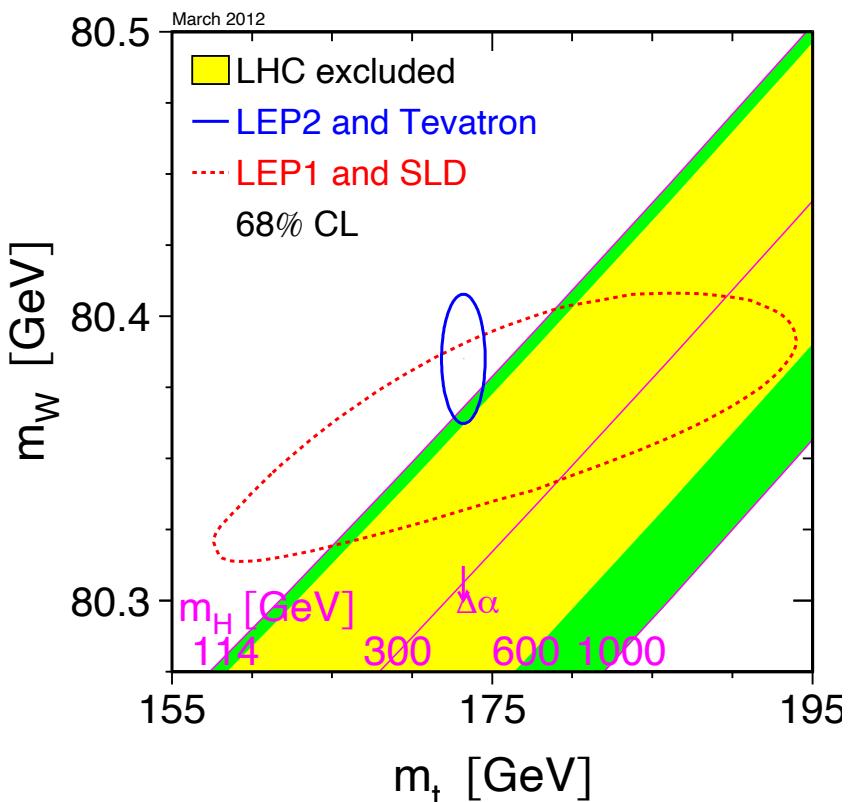
- Le boson de Higgs est responsable de la masse des bosons W et Z
... mais également de tous les fermions
 - constante de couplage
~masse du fermion ou masse² du boson
- Jusqu'en 2012, le boson de Higgs est resté la « pièce manquante du modèle standard »
 - recherche du Higgs à LEP2 dans les collisions e^+e^- à $\sqrt{s} > m_Z$ (1996–2000)
 - $m_H > 114.3 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL)
- Découverte en 2012 au LHC par les expériences ATLAS et CMS
 - prix Nobel en 2013 à François Englert et Peter Higgs



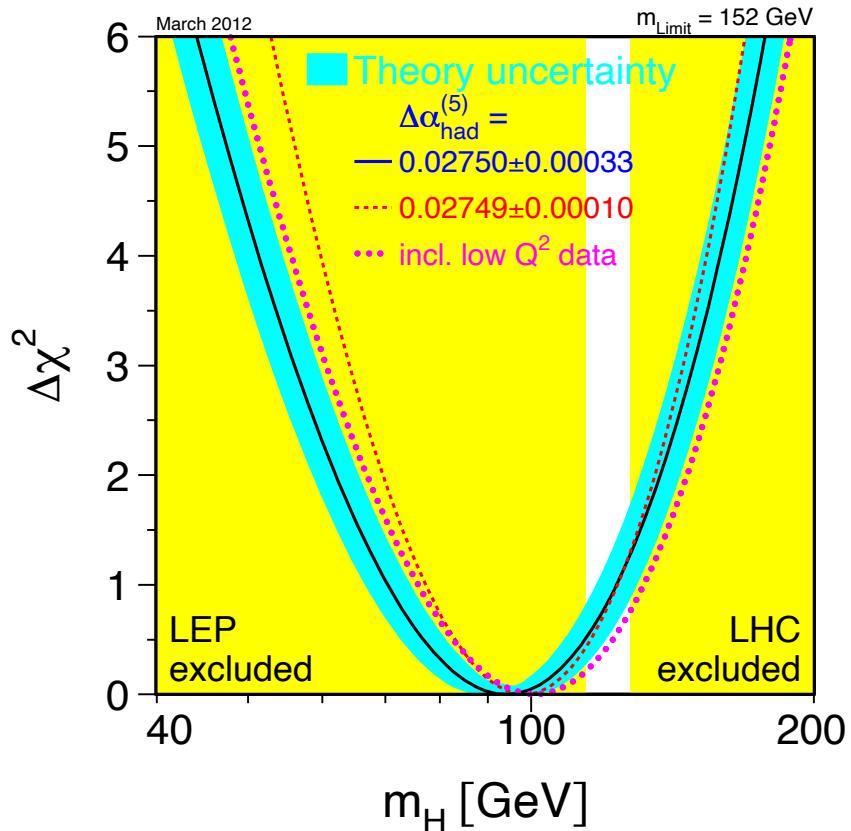
$$m_H = 125.1 \pm 0.14 \text{ GeV}/c^2$$

La cohérence du modèle standard

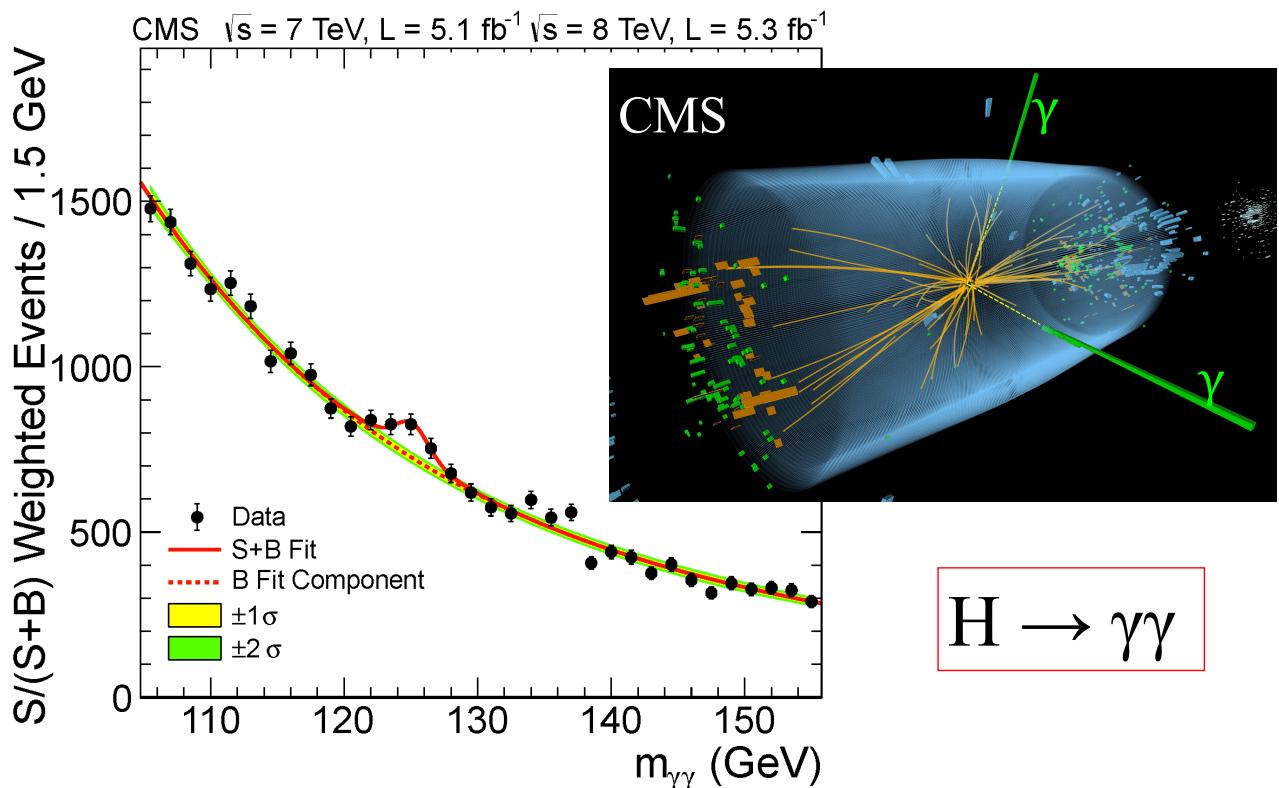
- Le modèle standard ne prédit pas la masse du Higgs, mais pour une valeur donnée de m_H , il prédit une relation entre m_W et m_t :
 - mesures directes de m_W et m_t
 - autres mesures pouvant être reliées m_W et m_t dans le cadre du modèle standard
 - prédiction du modèle standard pour $m_H = 114, 300, 1000 \text{ GeV}/c^2$



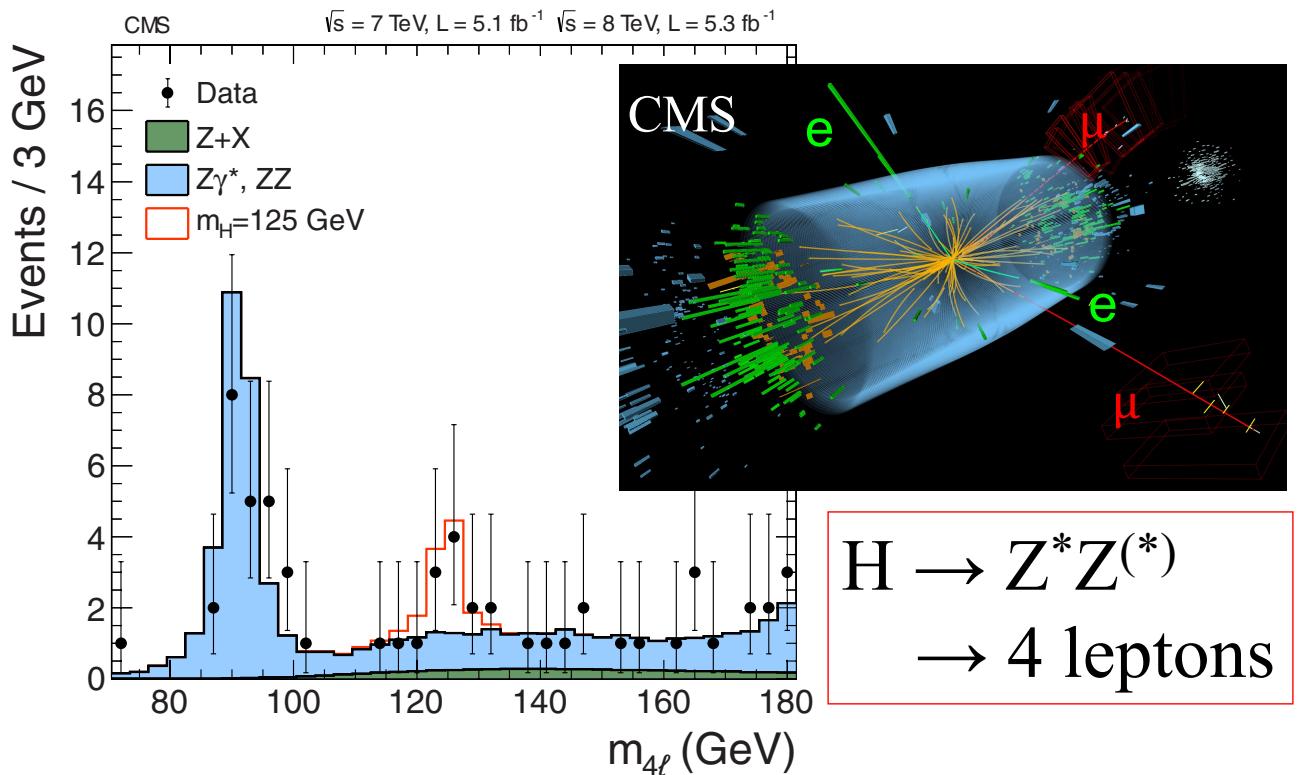
Masse du Higgs (mars 2012)



Découverte du Higgs (2012)

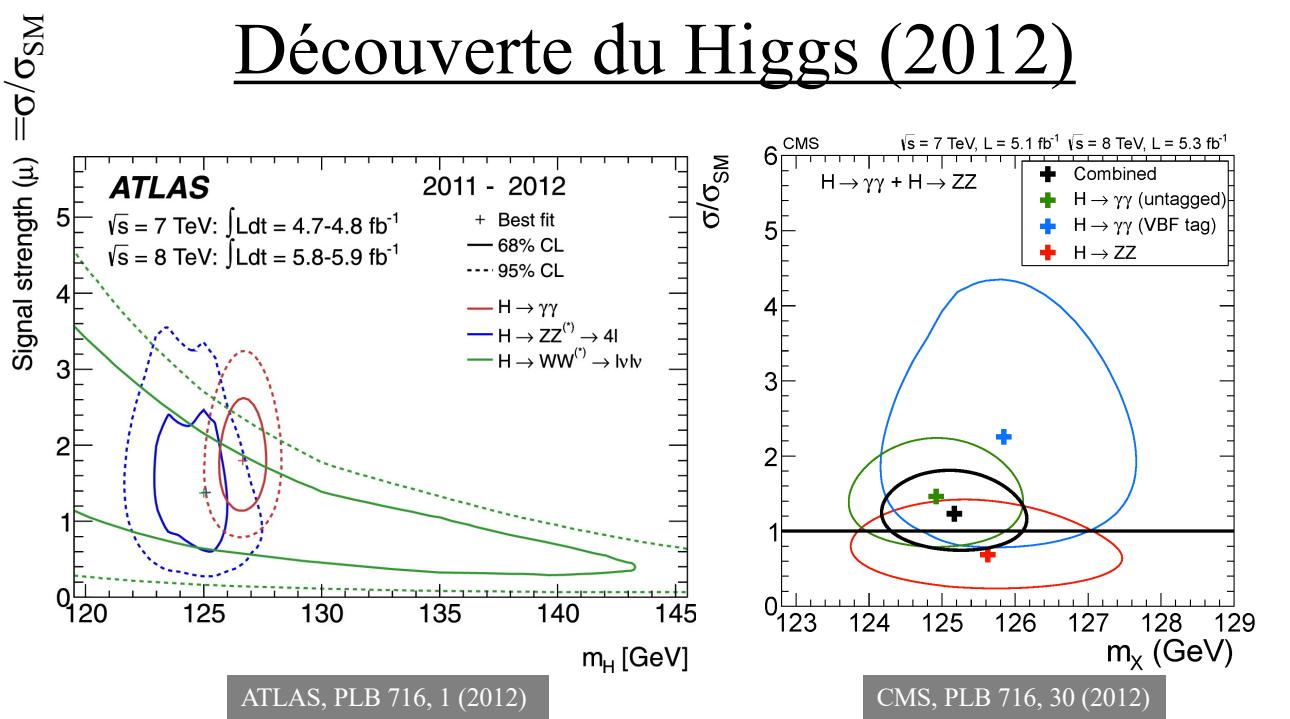


Découverte du Higgs (2012)



OS, 28 mai 2025

255



$$\text{ATLAS: } m_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4 \text{ GeV}/c^2$$

$$\text{CMS: } m_H = 125.3 \pm 0.4 \pm 0.5 \text{ GeV}/c^2$$

Valeur récente: $m_H = 125.25 \pm 0.17 \text{ GeV}/c^2$ pdglive.lbl.gov

OS, 28 mai 2025

255