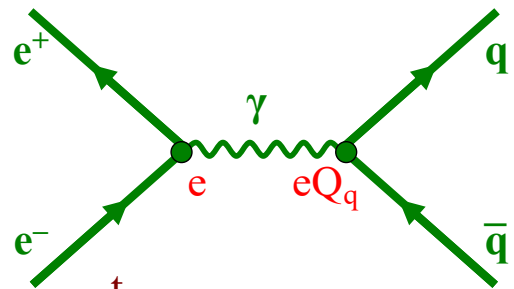
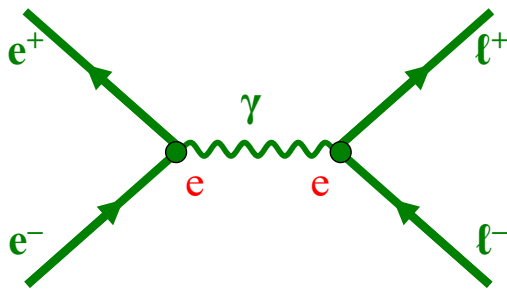


Production de fermions par e^+e^-

- Processus de QED



$\ell = \text{lepton chargé (e, } \mu, \tau)$

$q = \text{quark (d, u, s, c, b, t)}$

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

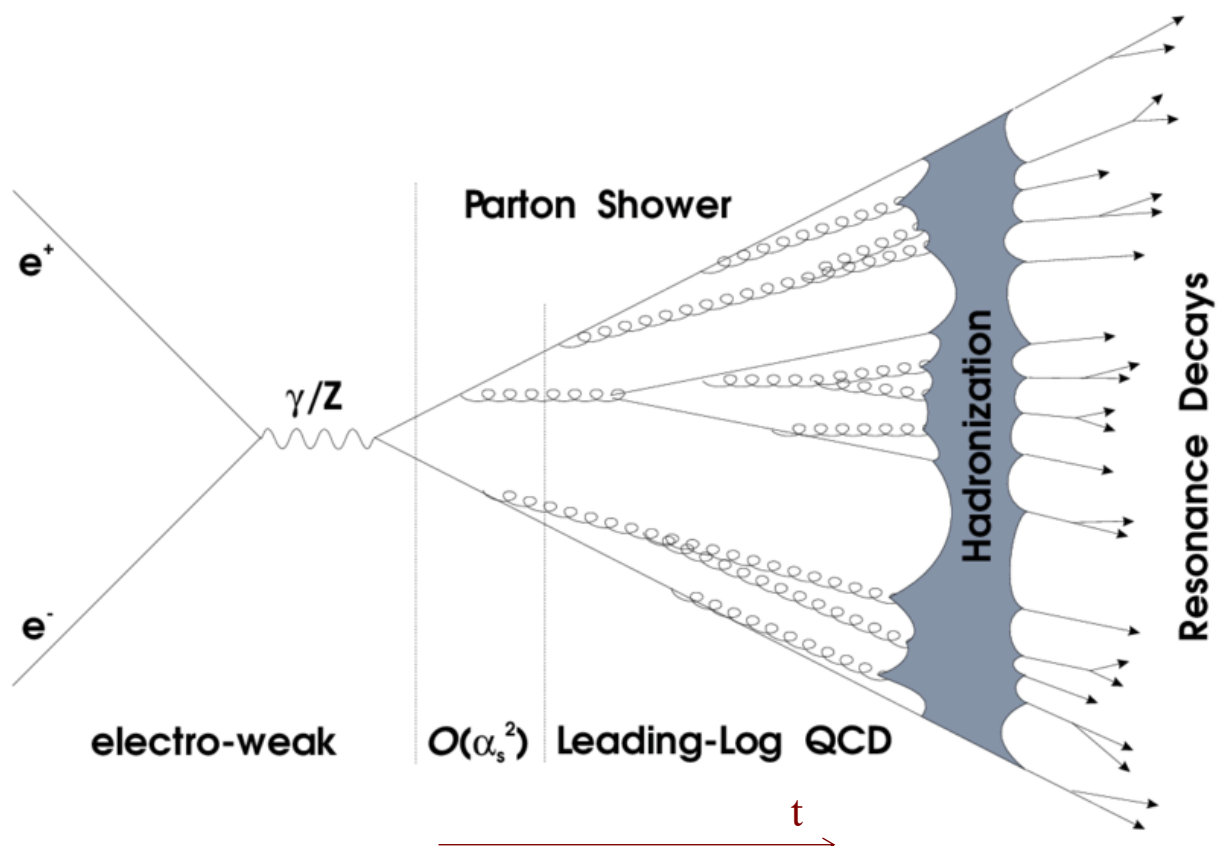
$$\sigma = |A|^2 \propto e^4 \propto \alpha^2$$

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

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

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

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



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

- 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:

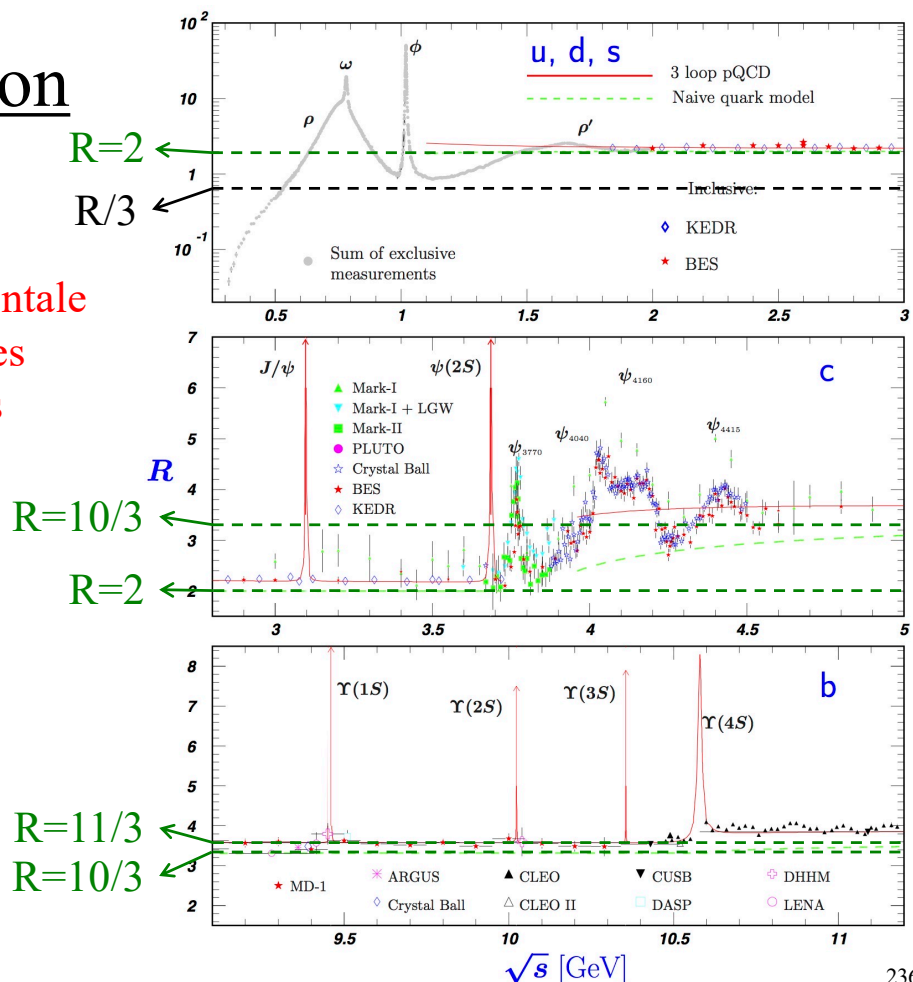
- si $\sqrt{s} < \sim 3$ GeV (J/ψ), on produit d, u, s $\rightarrow R = (1/3)^2 + (2/3)^2 + (1/3)^2 = 6/9$
- si $3 < \sqrt{s} < \sim 10$ GeV (Y), on produit d, u, s, c $\rightarrow R = \dots = 10/9$
- si $\sqrt{s} > \sim 10$ GeV, on produit d, u, s, c, b: $\rightarrow R = \dots = 11/9$



- 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

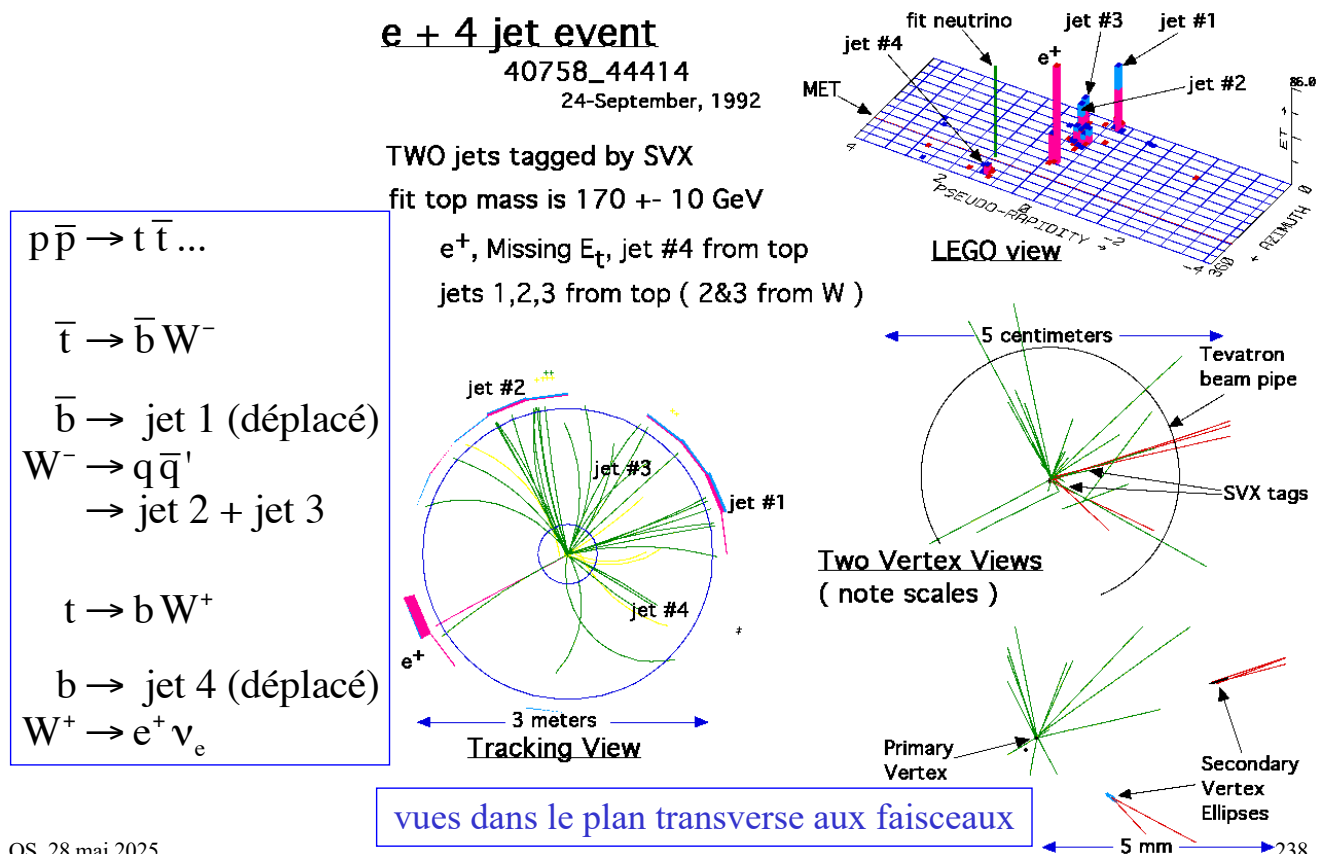
- Découvert en 1995 au Tevatron ($p\bar{p}$ à $\sqrt{s} = 1.8 \text{ TeV}$) à Fermilab par les collaborations CDF et D0
- La plus massive des particules élémentaires connues:
 $m_t = 172.57 \pm 0.29 \text{ GeV}/c^2$
- Le quark t se désintègre avant d'avoir eu le temps de s'hadroniser (de se lier à d'autres 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:
 - $m_{Z^0} = 93.8 \pm 2.5 \text{ GeV}/c^2$
 - $m_{W^\pm} = 83.0 \pm 3.0 \text{ GeV}/c^2$

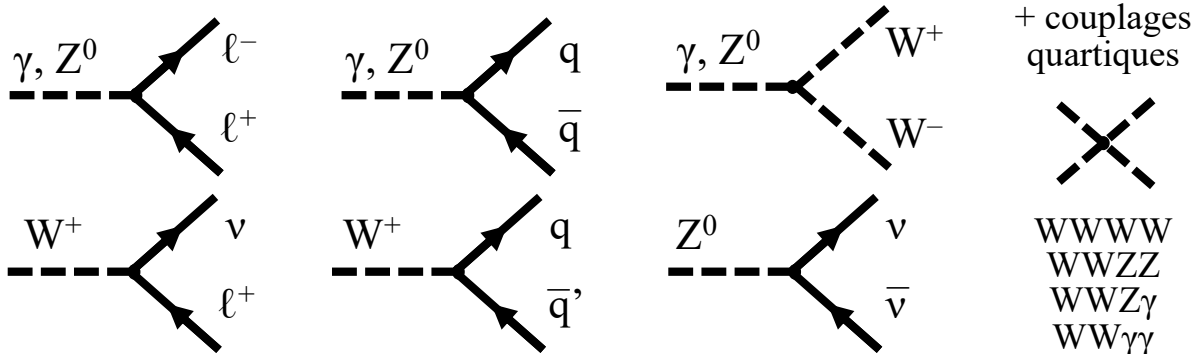
Maxwell: ~ 1864

unification des forces électrique et magnétique

Glashow, Salam, Weinberg: 1961–1968

unification des forces électromagnétique et faible

- Couplages:

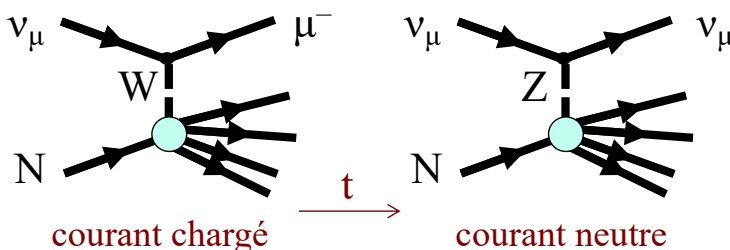


OS, 28 mai 2025

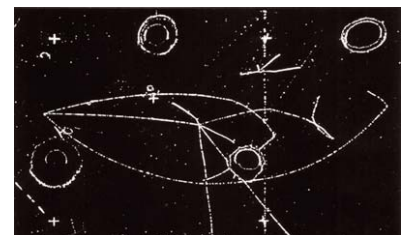
239

Découvertes des bosons vecteurs W et Z

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



$$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \dots$$



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

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

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

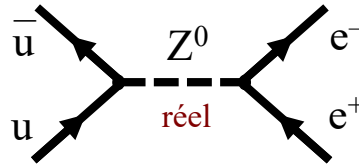
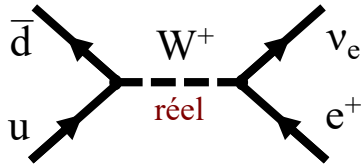
- 1984: prix Nobel à Rubbia et Van der Meer

OS, 28 mai 2025

240

Production de W et Z réels

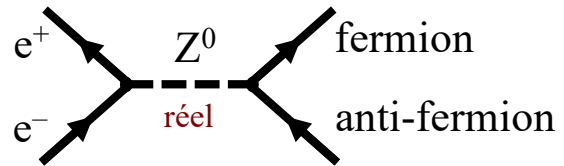
- Dans les collisions $p\bar{p}$ au SPS (1983–), puis Tevatron ...



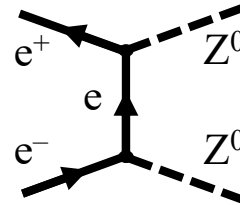
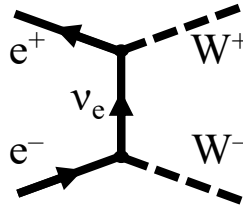
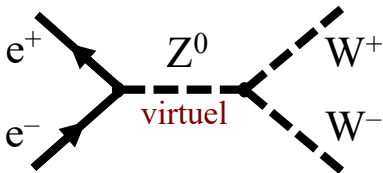
\xrightarrow{t}

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

– 1989–1995: $\sqrt{s} \sim m_Z c^2$



– 1995–2000: $\sqrt{s} > 2m_Z c^2$



OS, 28 mai 2025

241

Nombre de neutrinos

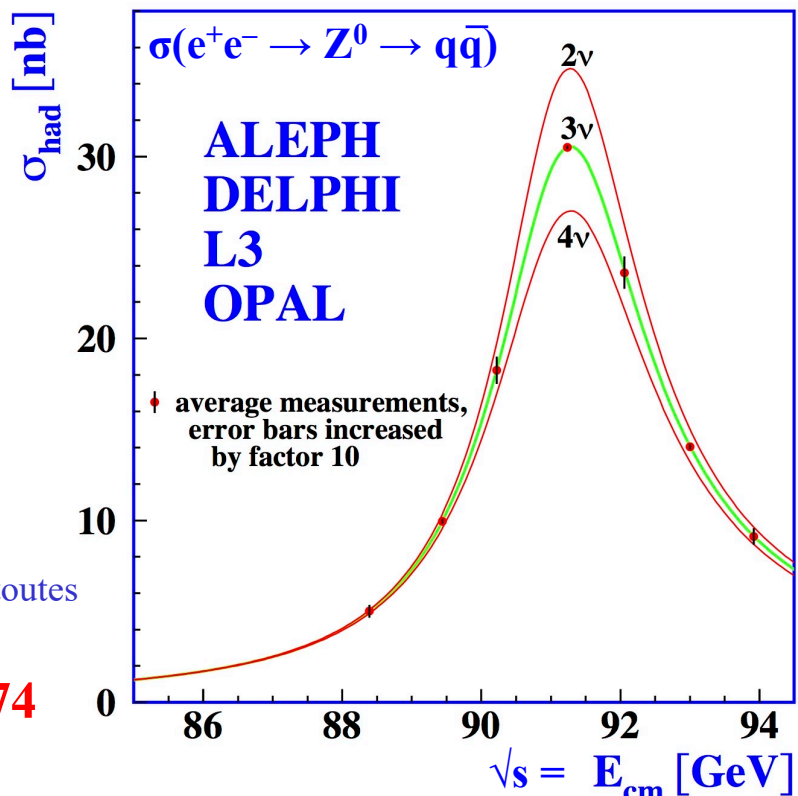
- N_ν = nombre de types de neutrinos légers ($m_\nu < m_Z/2$) ayant un couplage avec le Z^0

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

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

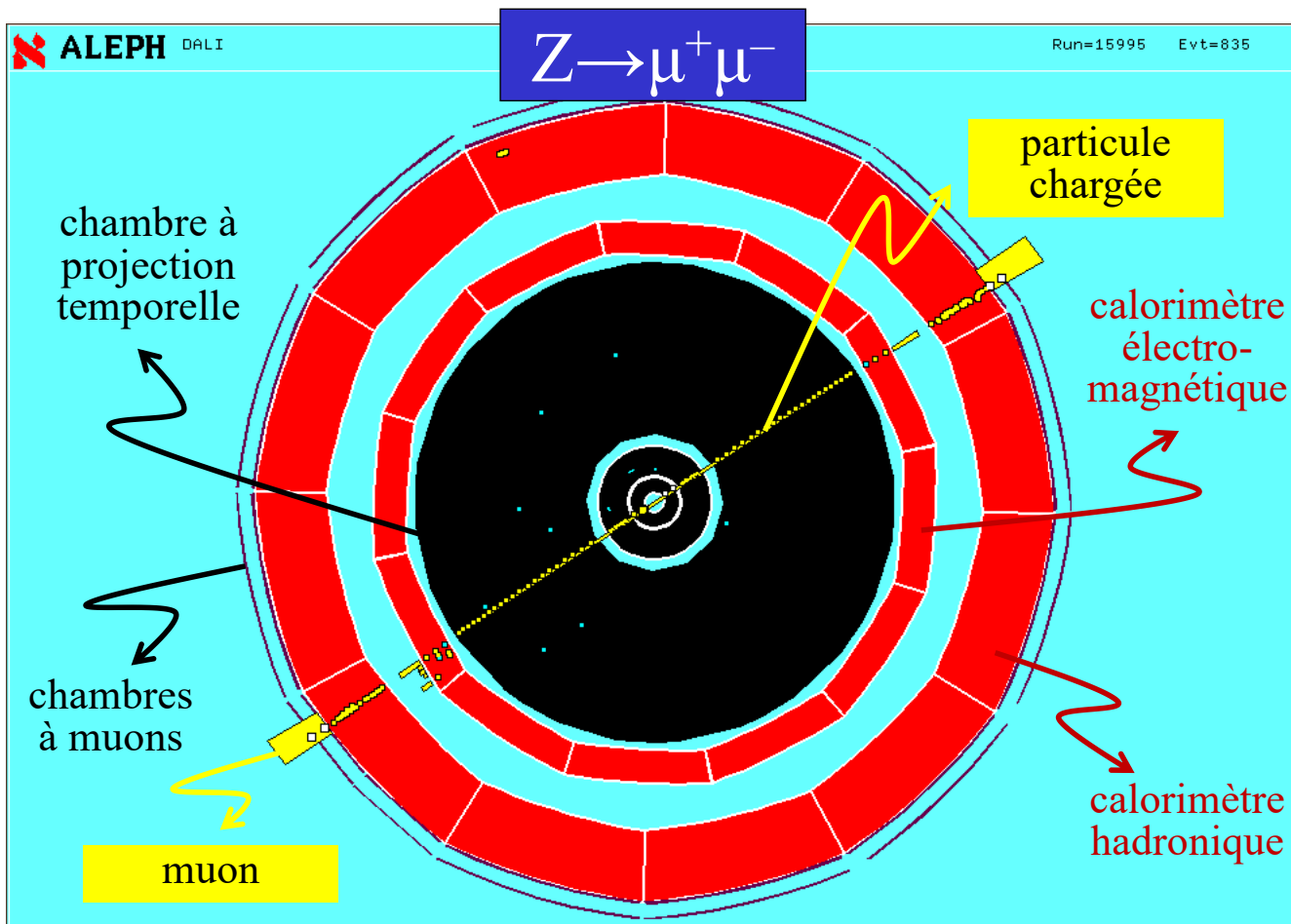
- détermination à partir de toutes les données du LEP:

$$N_\nu = 2.9963 \pm 0.0074$$



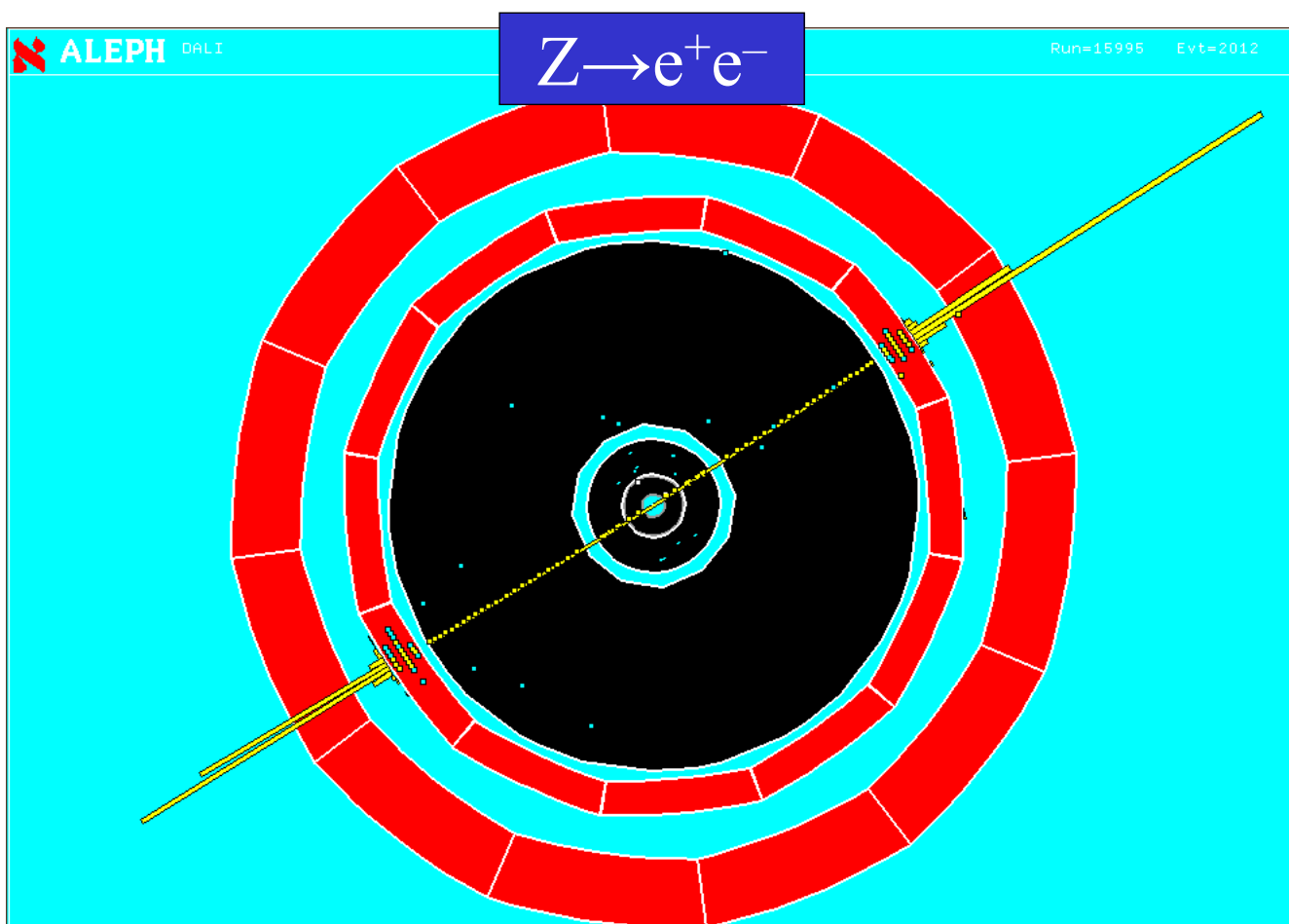
OS, 28 mai 2025

242



OS, 28 mai 2025

243

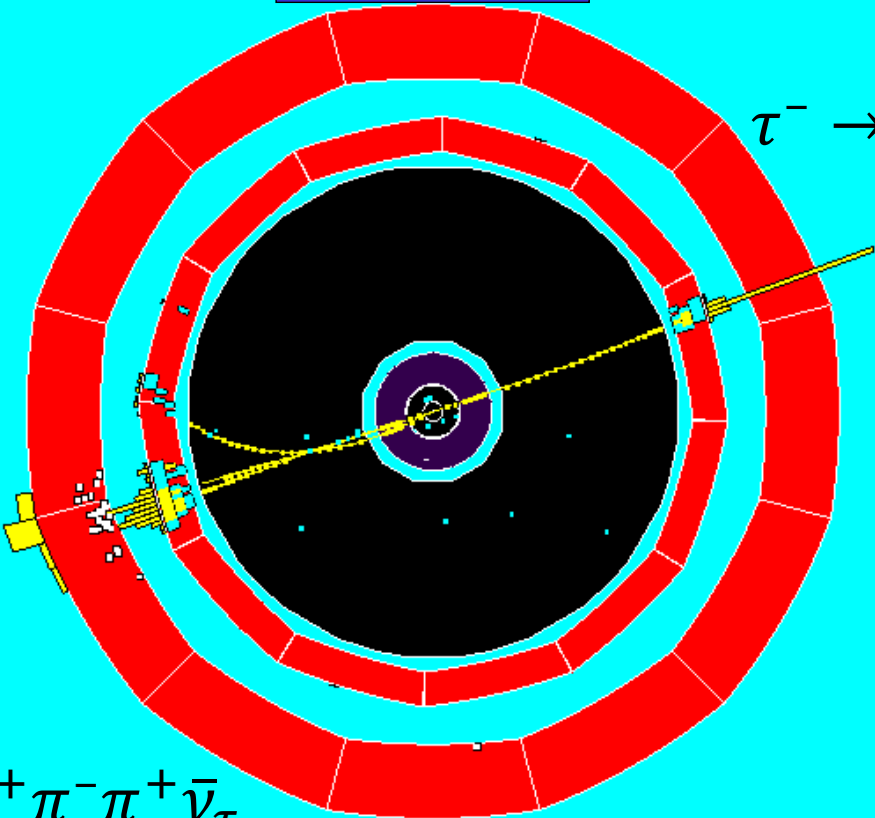


OS, 28 mai 2025

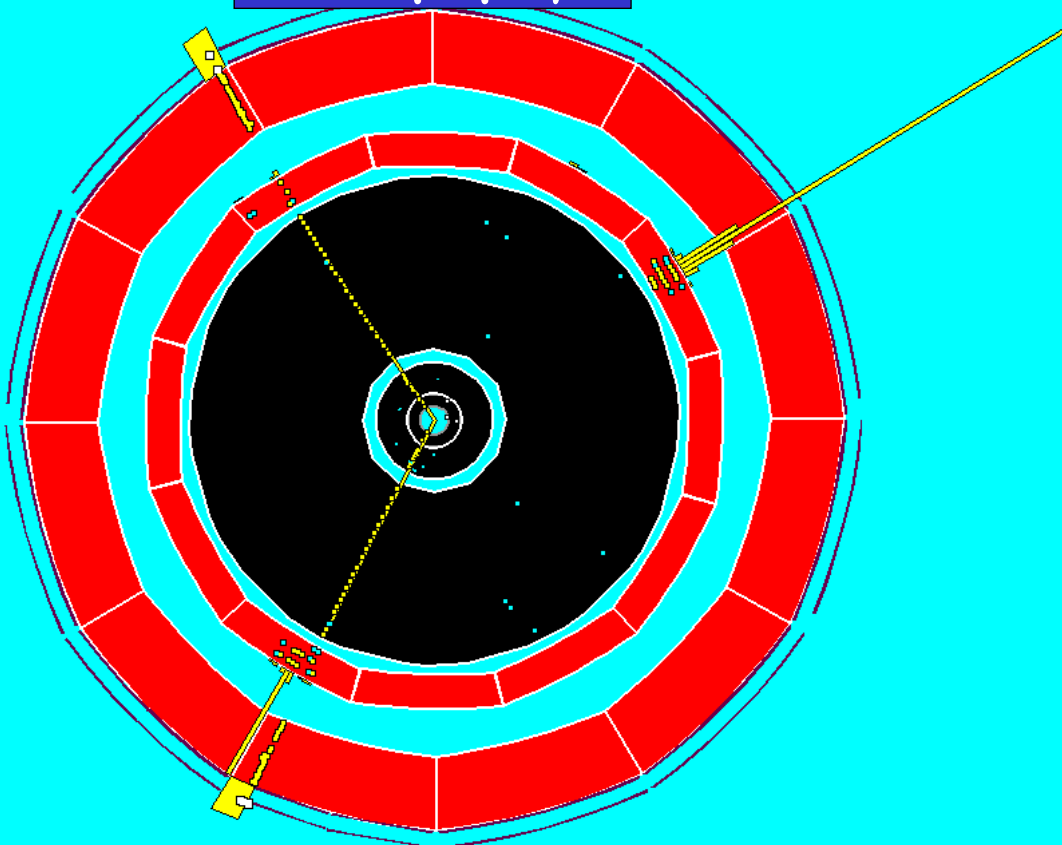
244

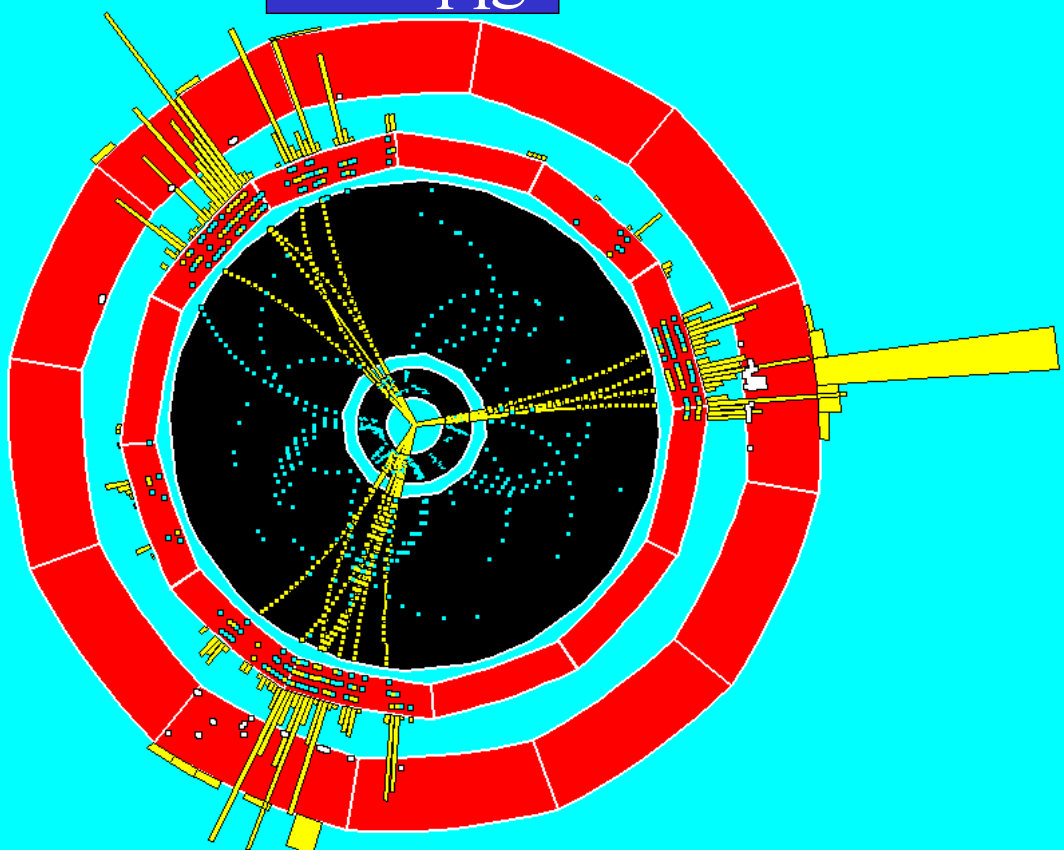
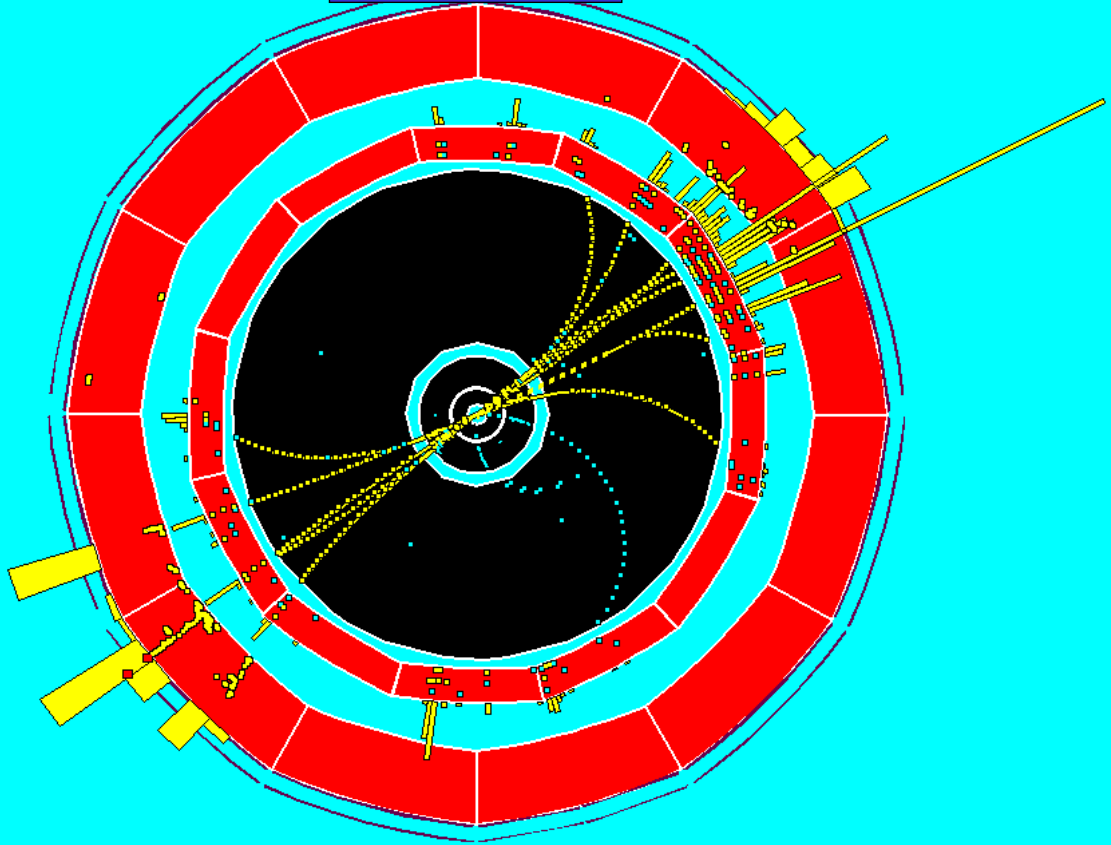
$$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

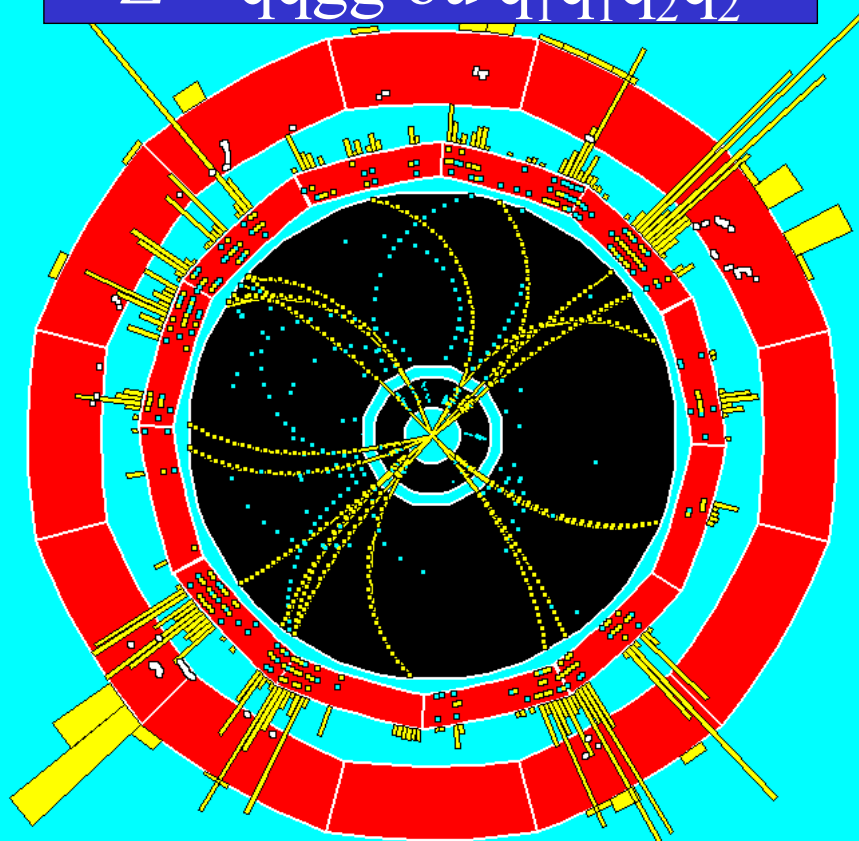
$$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$$

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \bar{\nu}_\tau$$


$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$$







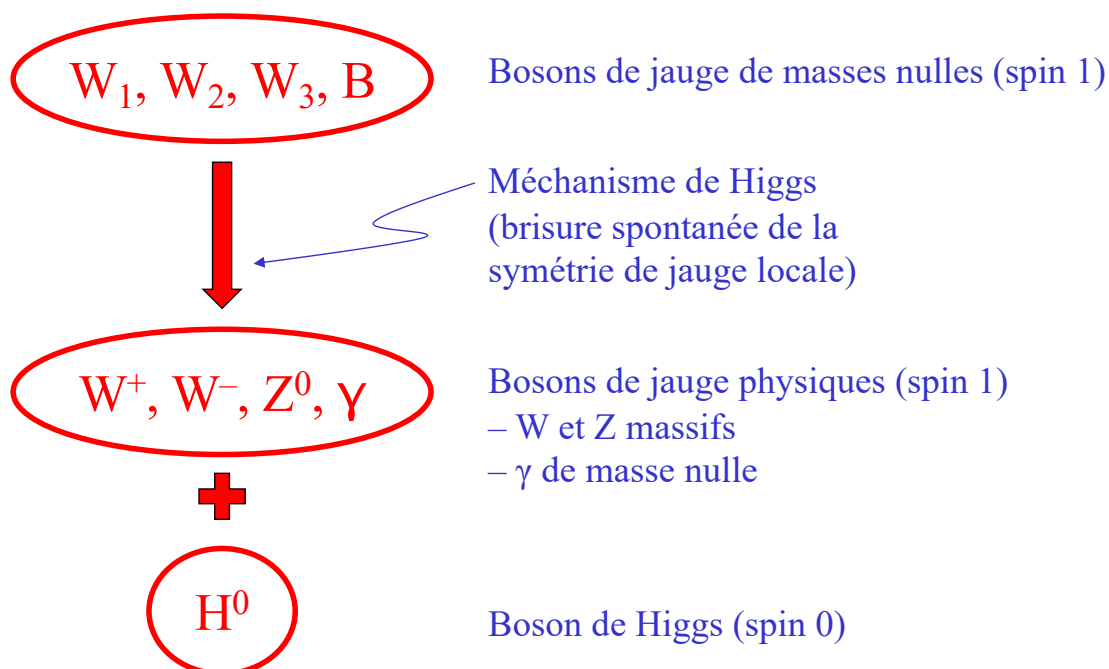
OS, 28 mai 2025

249

Théorie électrofaible

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

- Théorie quantique des champs
avec invariance de jauge locale



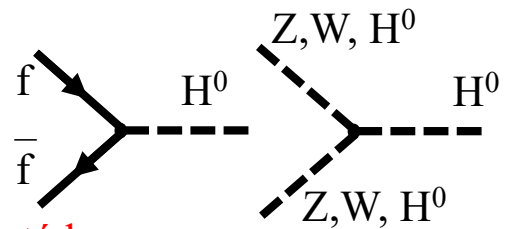
OS, 28 mai 2025

250

Boson de Higgs H^0

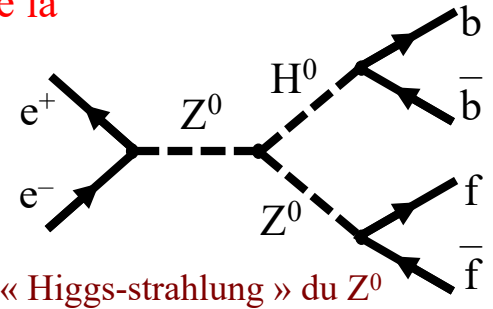
- Le boson de Higgs est responsable de la masse des bosons W et Z ... mais également de tous les fermions

- 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)



« Higgs-strahlung » du Z^0

- Découverte en 2012 au LHC par les expériences ATLAS et CMS

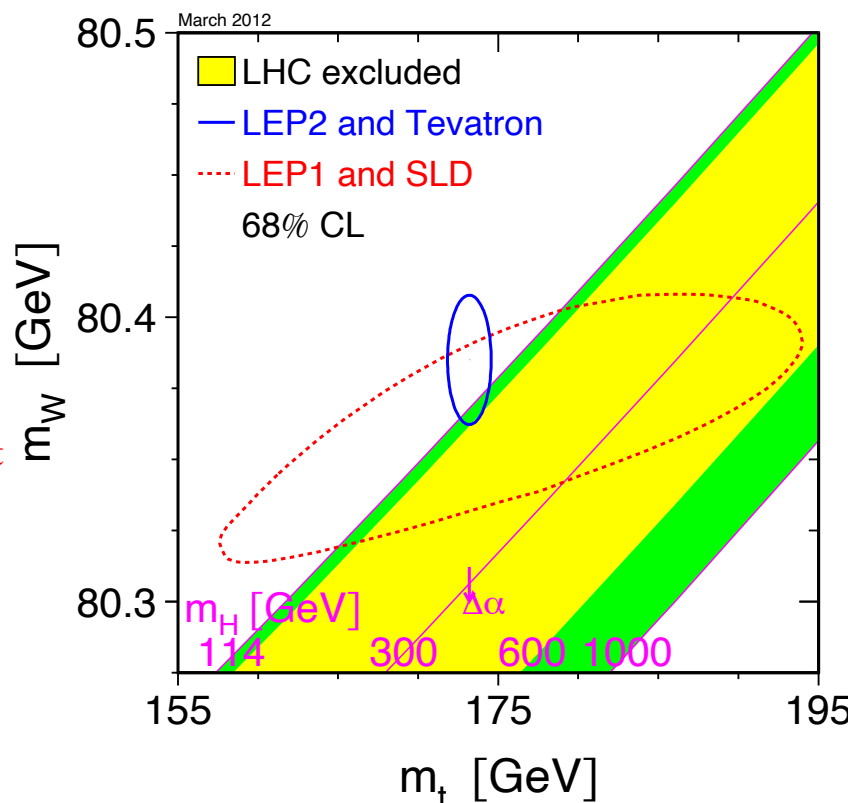
- prix Nobel en 2013 à
François Englert et Peter Higgs

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

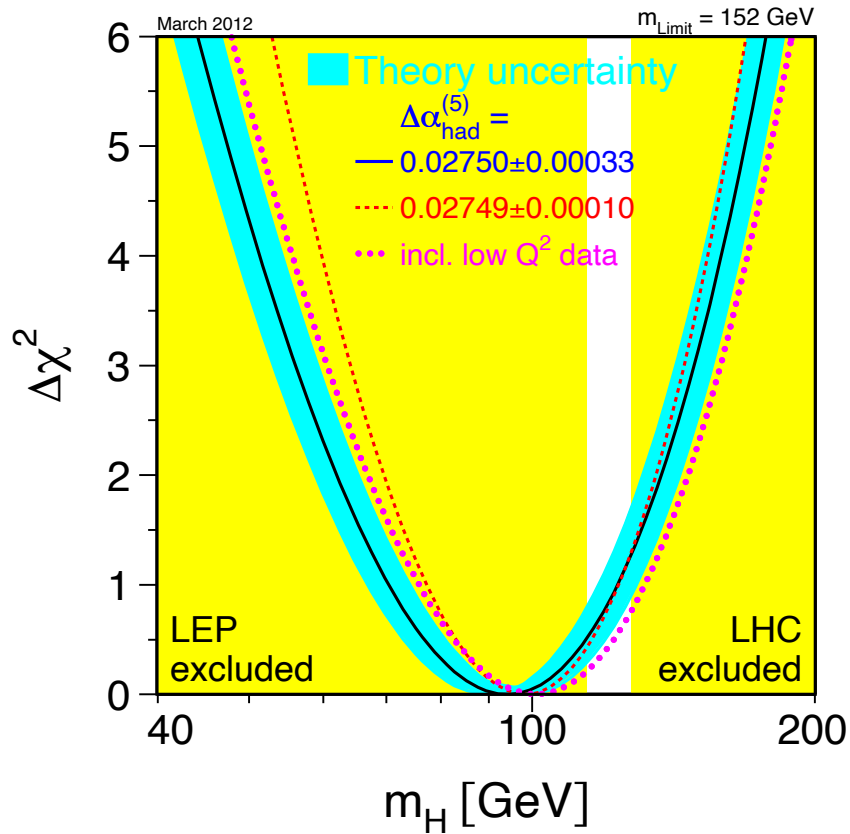
La cohérence du modèle standard

- 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 $m_H = 114, 300, 1000 \text{ GeV}/c^2$



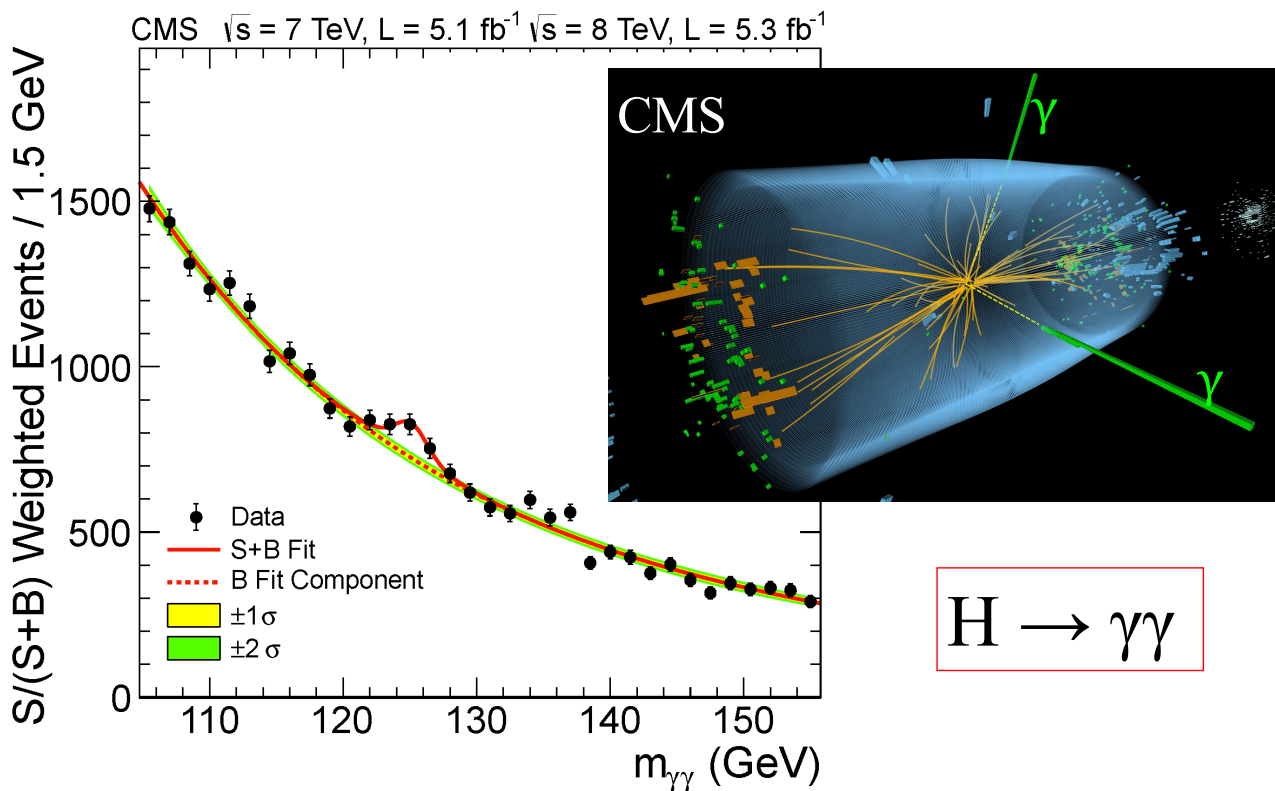
Masse du Higgs (mars 2012)



OS, 28 mai 2025

253

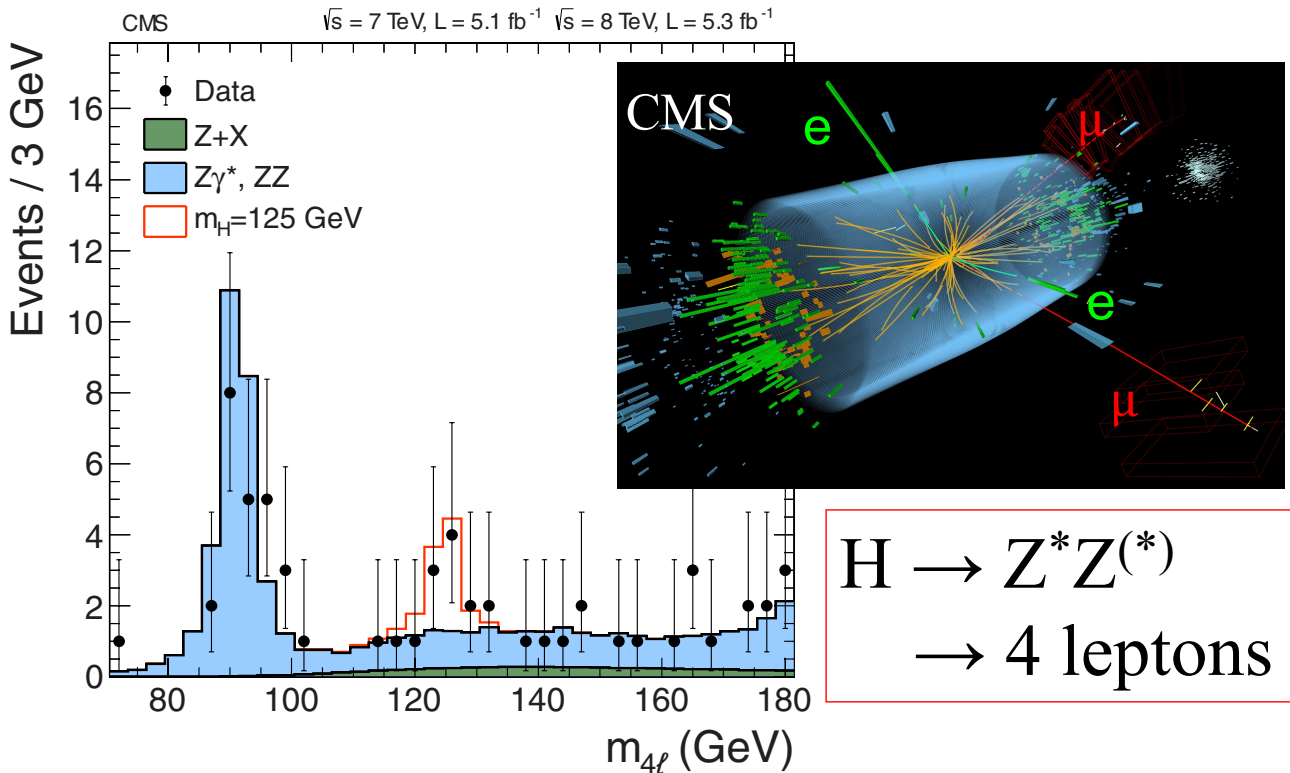
Découverte du Higgs (2012)



OS, 28 mai 2025

254

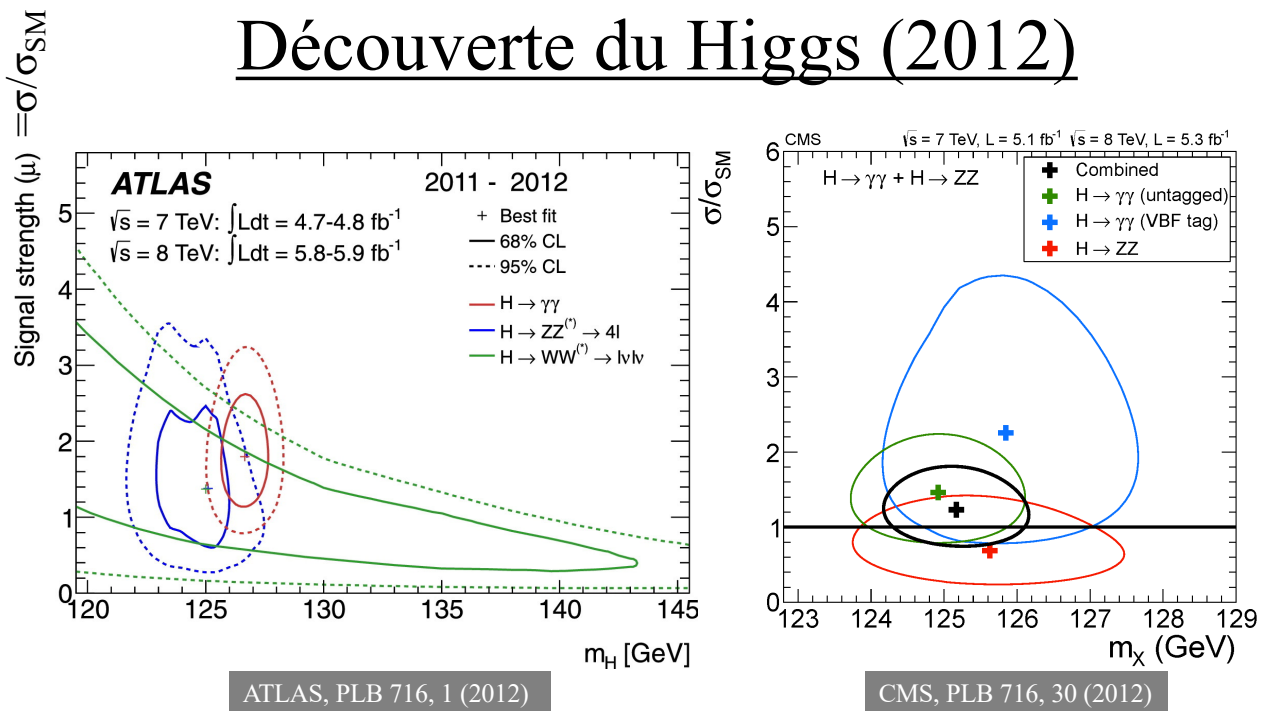
Découverte du Higgs (2012)



OS, 28 mai 2025

255

Découverte du Higgs (2012)



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

256