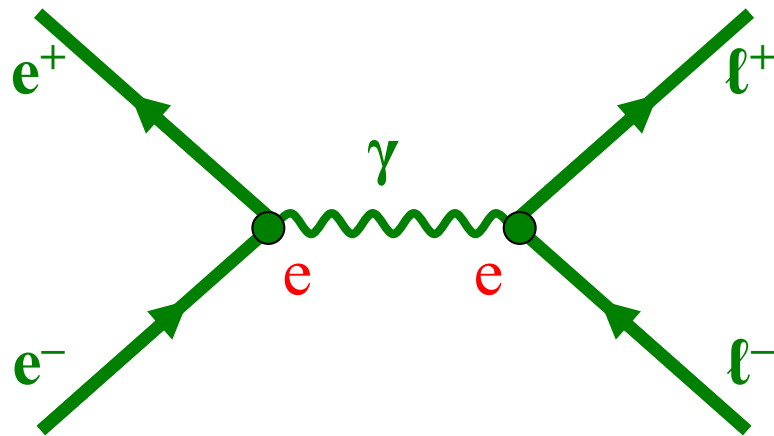


# Production de fermions par $e^+e^-$

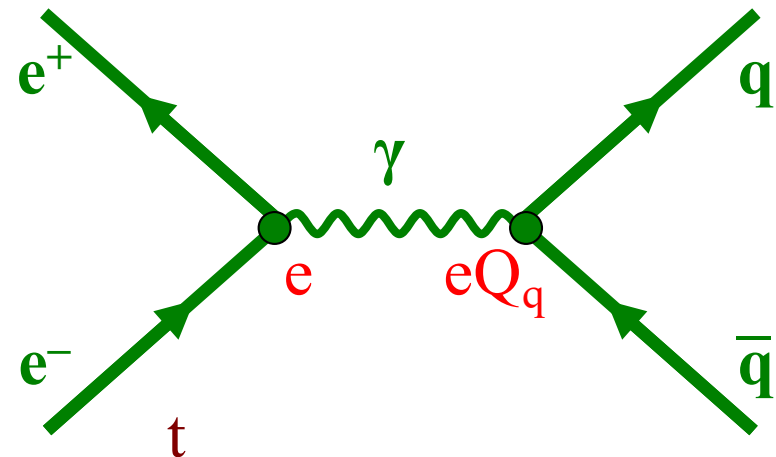
- Processus de QED



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

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

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



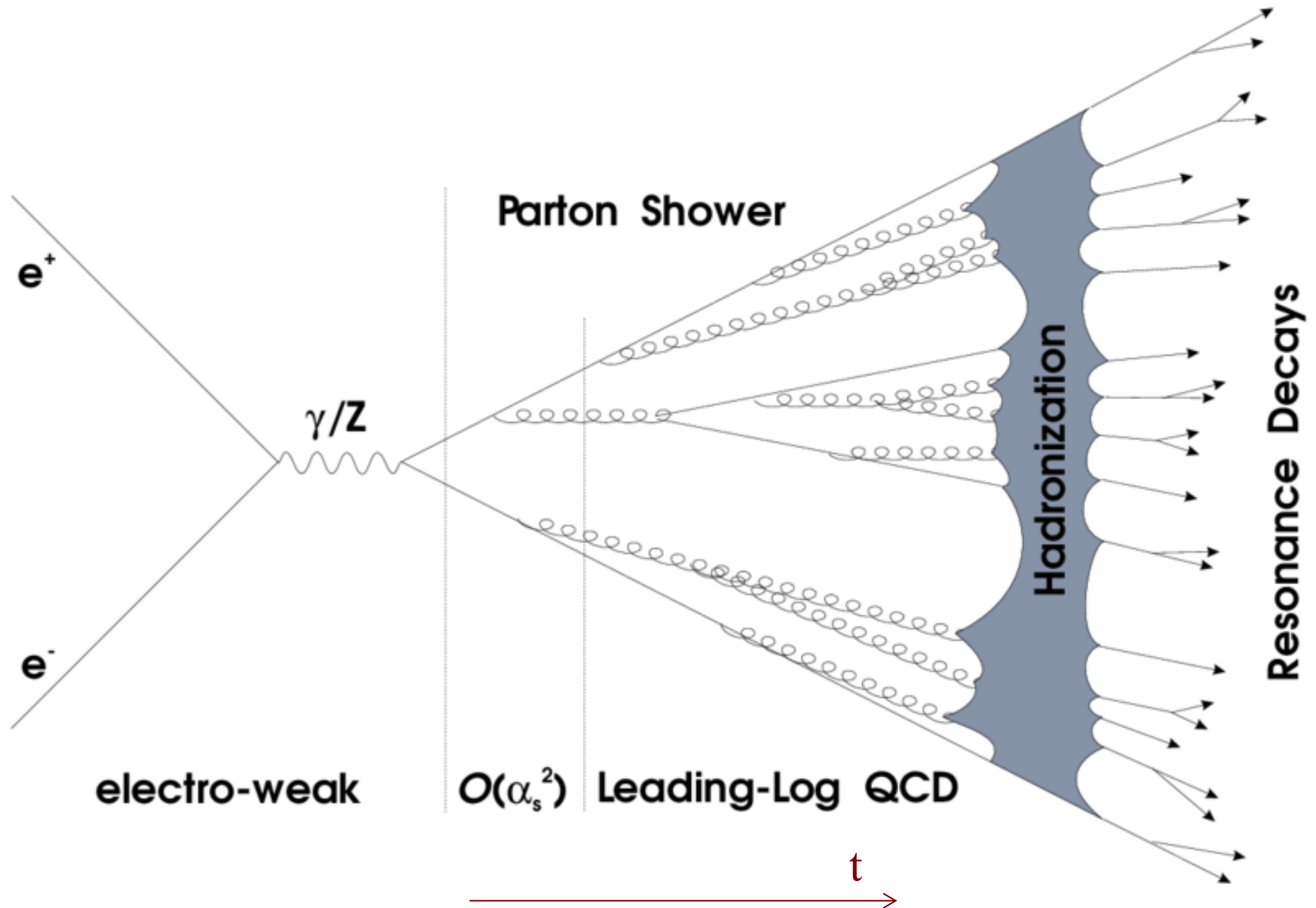
$q$  = quark ( $d, u, s, c, b, t$ )

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

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

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

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



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

- 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:

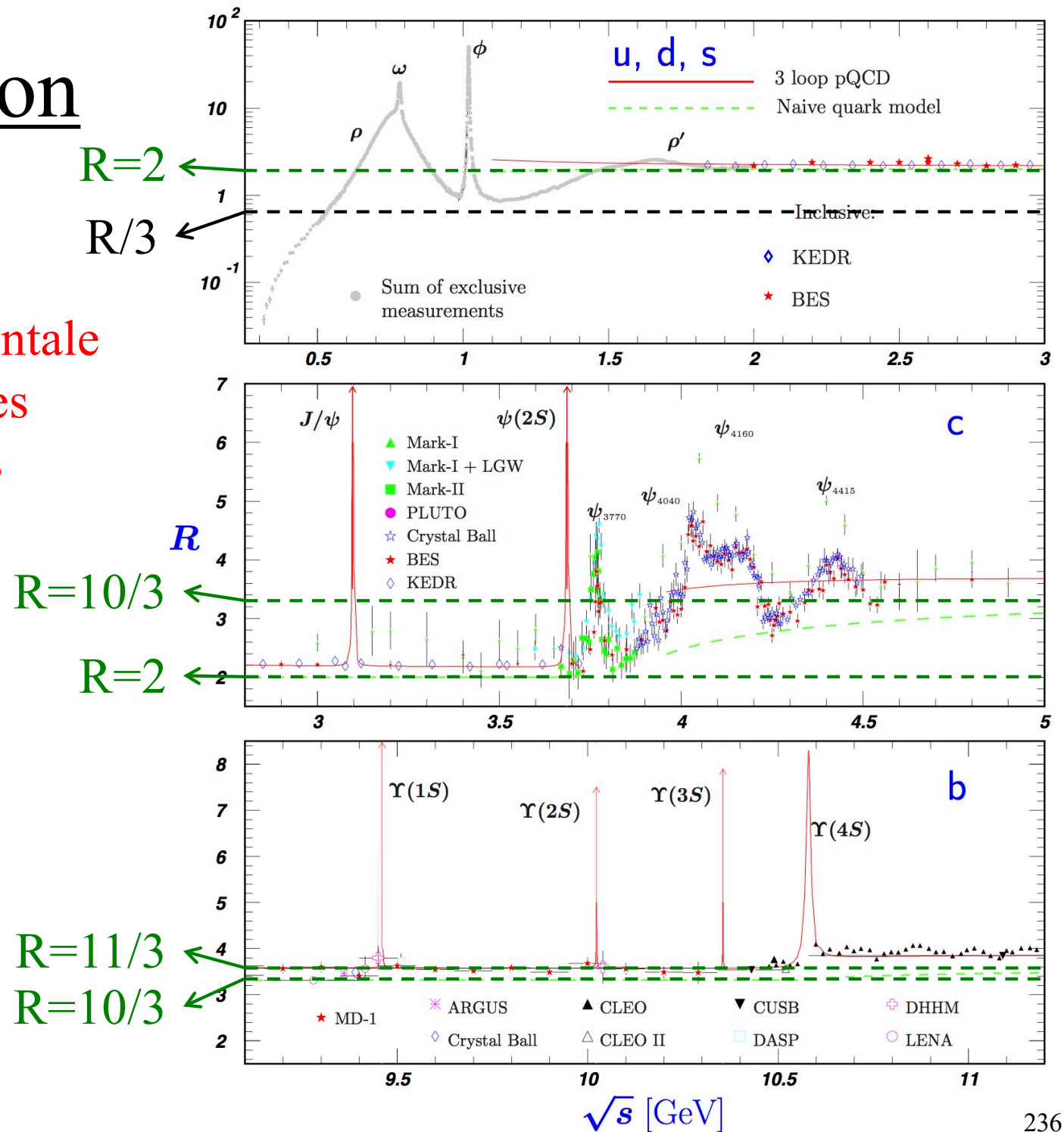
- si  $\sqrt{s} < \sim 3$  GeV ( $J/\psi$ ), on produit d, u, s  $\rightarrow R = (1/3)^2 + (2/3)^2 + (1/3)^2 = 6/9$
- si  $3 < \sqrt{s} < \sim 10$  GeV (Y), on produit d, u, s, c  $\rightarrow R = \dots = 10/9$
- si  $\sqrt{s} > \sim 10$  GeV, on produit d, u, s, c, b:  $\rightarrow R = \dots = 11/9$



- 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

$$\begin{array}{l} t \rightarrow W^+ b \\ \bar{t} \rightarrow W^- \bar{b} \end{array}$$

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

**e + 4 jet event**

40758\_44414

24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

fit top mass is  $170 \pm 10$  GeV

$e^+$ , Missing  $E_t$ , jet #4 from top

jets 1,2,3 from top ( 2&3 from W )

$p\bar{p} \rightarrow t\bar{t} \dots$

$\bar{t} \rightarrow \bar{b} W^-$

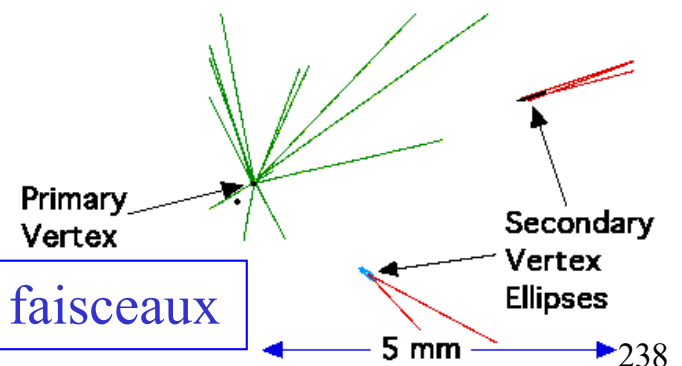
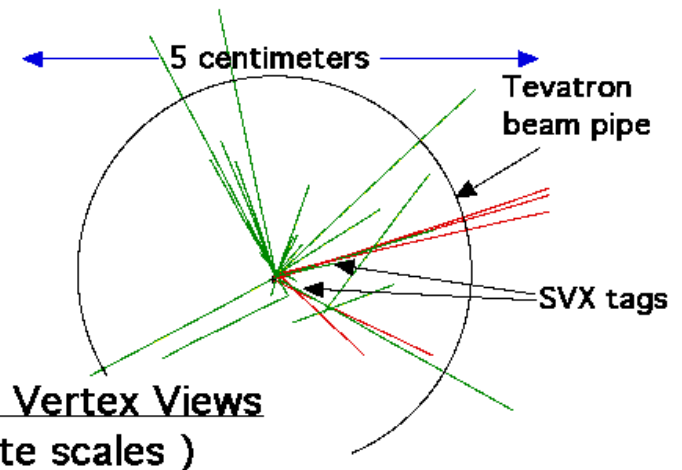
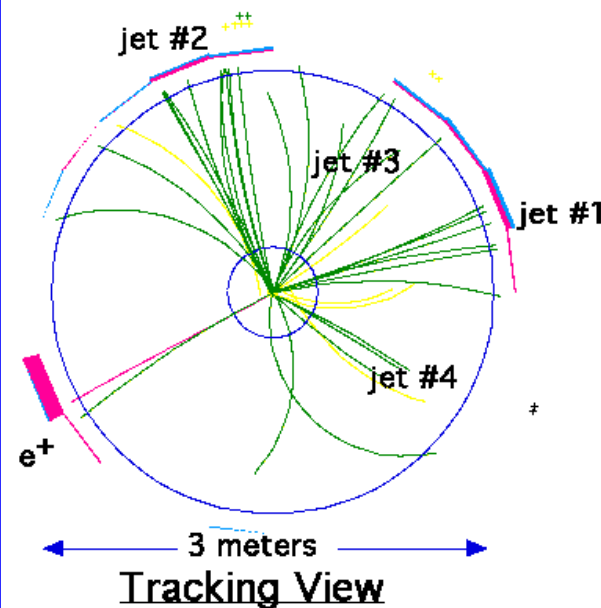
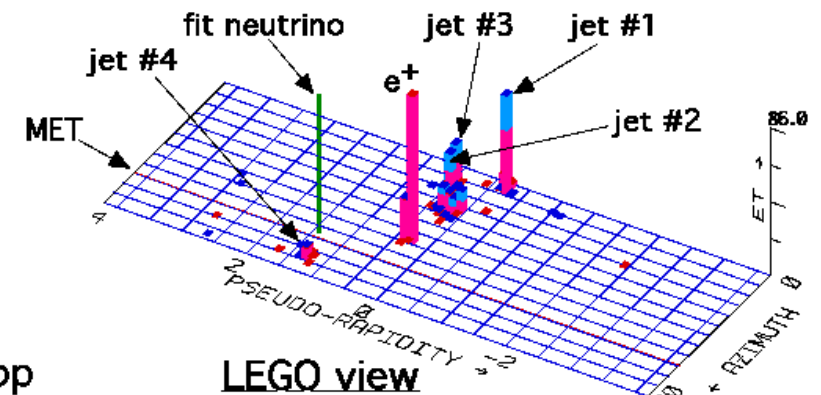
$\bar{b} \rightarrow \text{jet 1 (déplacé)}$

$W^- \rightarrow q\bar{q}'$   
 $\rightarrow \text{jet 2 + jet 3}$

$t \rightarrow b W^+$

$b \rightarrow \text{jet 4 (déplacé)}$

$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$



vues dans le plan transverse aux faisceaux

# Théorie électrofaible

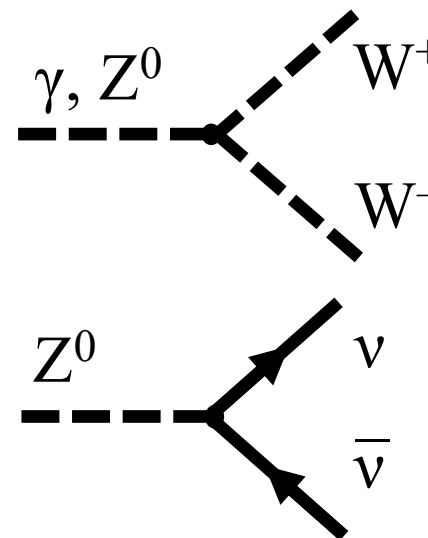
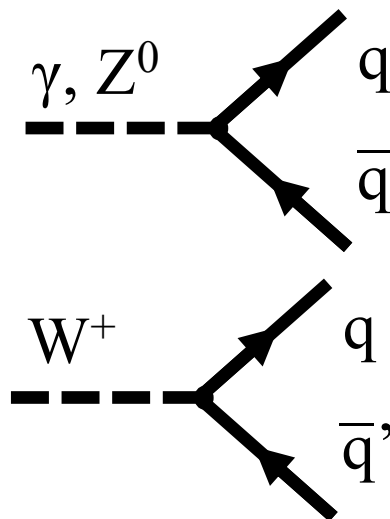
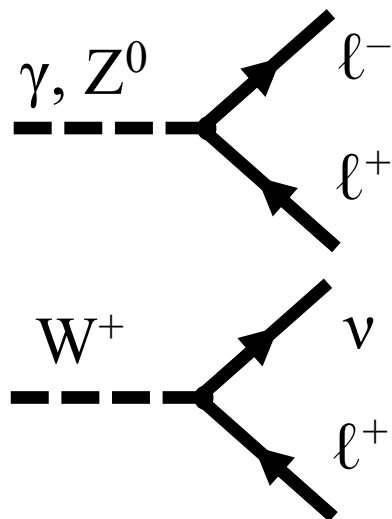
- 4 bosons d'échange:  $\gamma$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ 
  - le mécanisme de Higgs (= brisure spontanée de la symétrie de jauge locale) engendre une masse pour les Z et W:
    - $m_{Z^0} = 93.8 \pm 2.5 \text{ GeV}/c^2$
    - $m_{W^\pm} = 83.0 \pm 3.0 \text{ GeV}/c^2$

prédictions  
de GSW

Maxwell:  $\sim 1864$   
**unification des forces  
électrique et magnétique**

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

## Couplages:



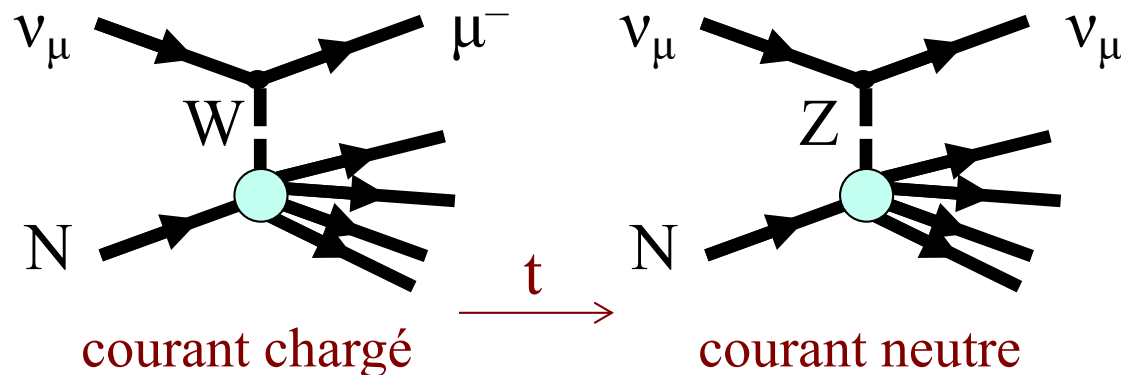
+ couplages  
quartiques



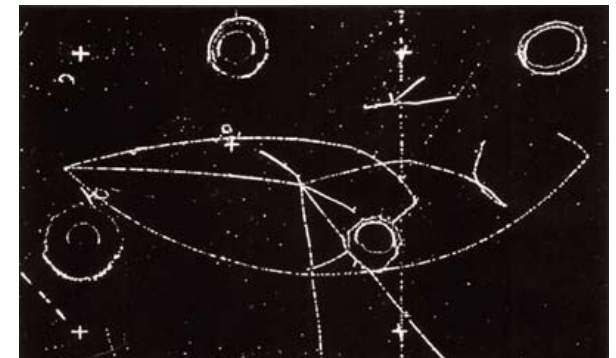
WWWW  
WWZZ  
WWZ $\gamma$   
WW $\gamma\gamma$

# 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 ( $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ )

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

{

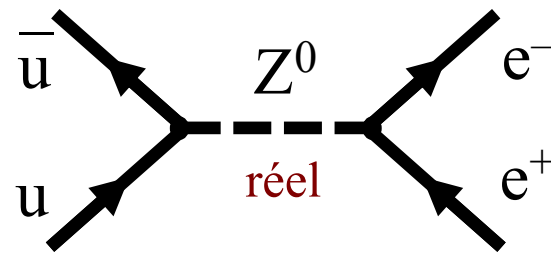
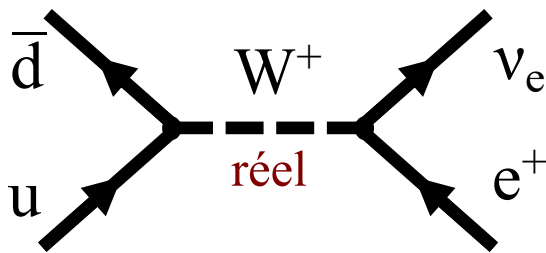
 Rubbia et al. (UA1)  
 Darriulat et al. (UA2)

- 1984: prix Nobel à Rubbia et Van der Meer



# Production de W et Z réels

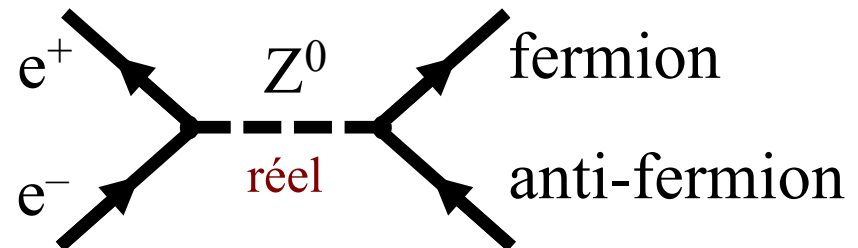
- Dans les collisions  $p\bar{p}$  au SPS (1983–), puis Tevatron ...



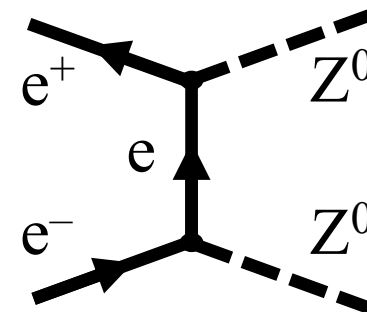
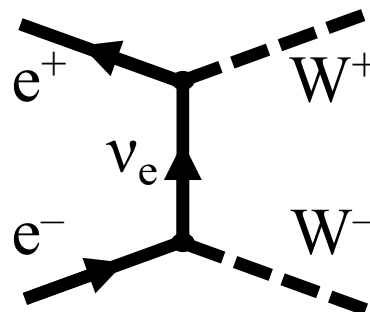
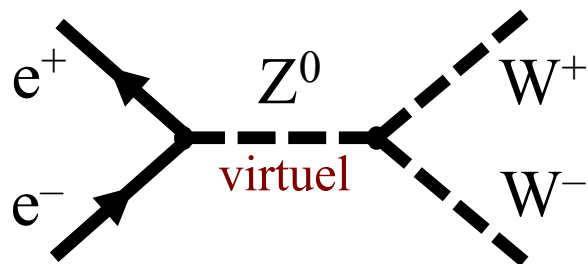
$\xrightarrow{t}$

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

– 1989–1995:  $\sqrt{s} \sim m_Z c^2$



– 1995–2000:  $\sqrt{s} > 2m_Z c^2$



# Nombre de neutrinos

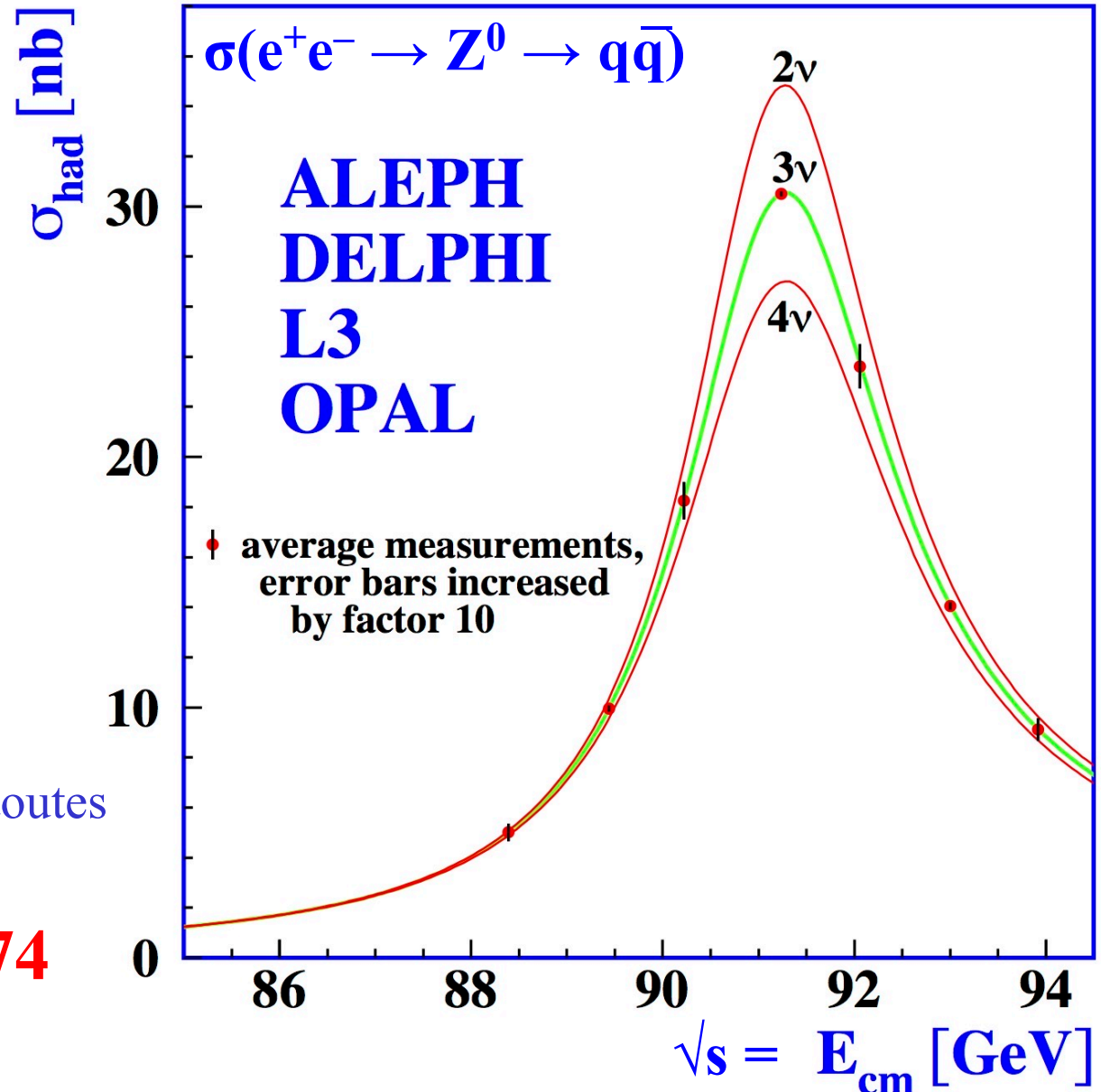
- $N_\nu$  = nombre de types de neutrinos légers ( $m_\nu < m_Z/2$ ) ayant un couplage avec le  $Z^0$

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

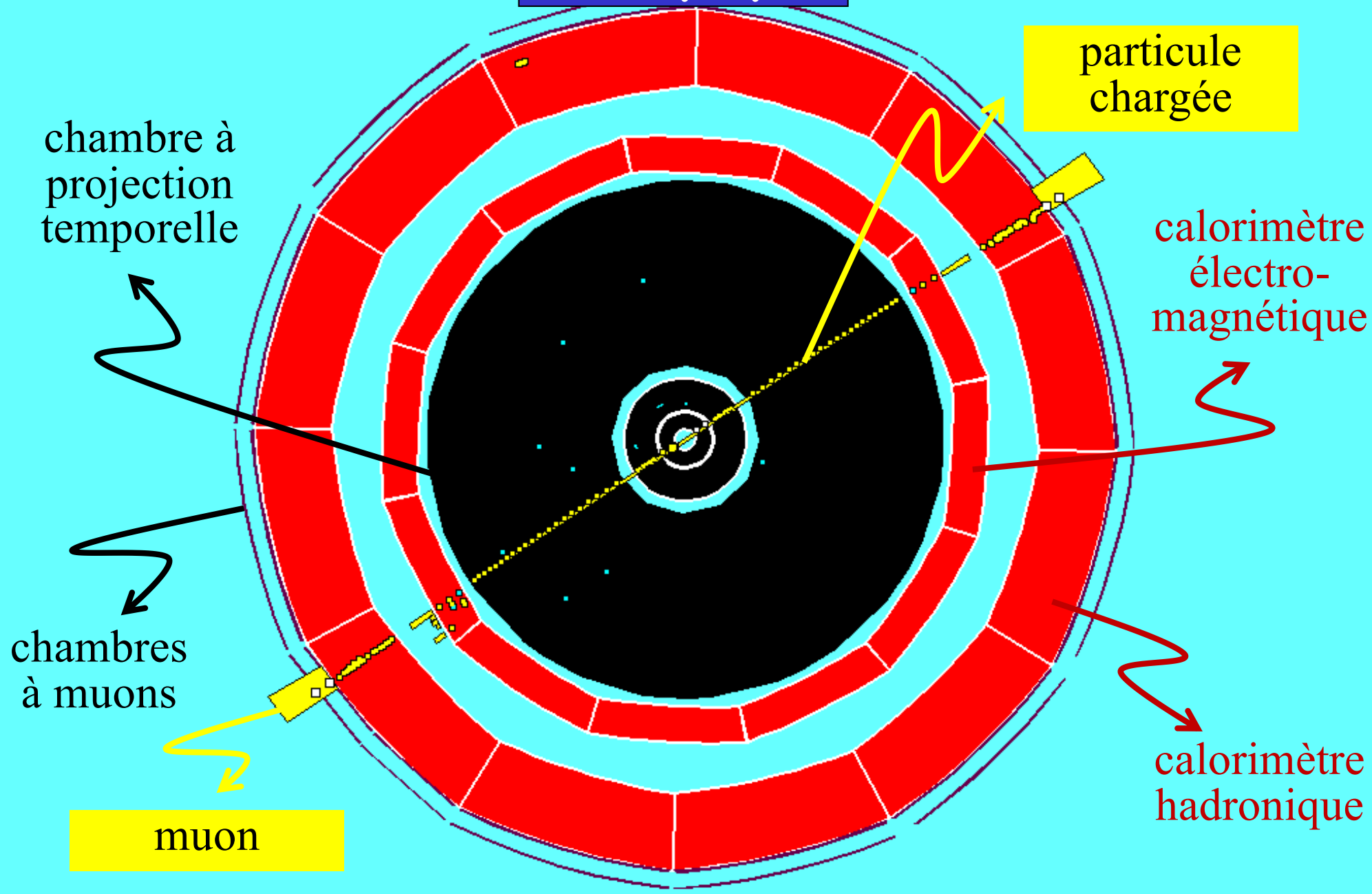
$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{\ell^+\ell^-}} \left( \frac{\Gamma_{\ell^+\ell^-}}{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}} \right)_{\text{MS}}$$

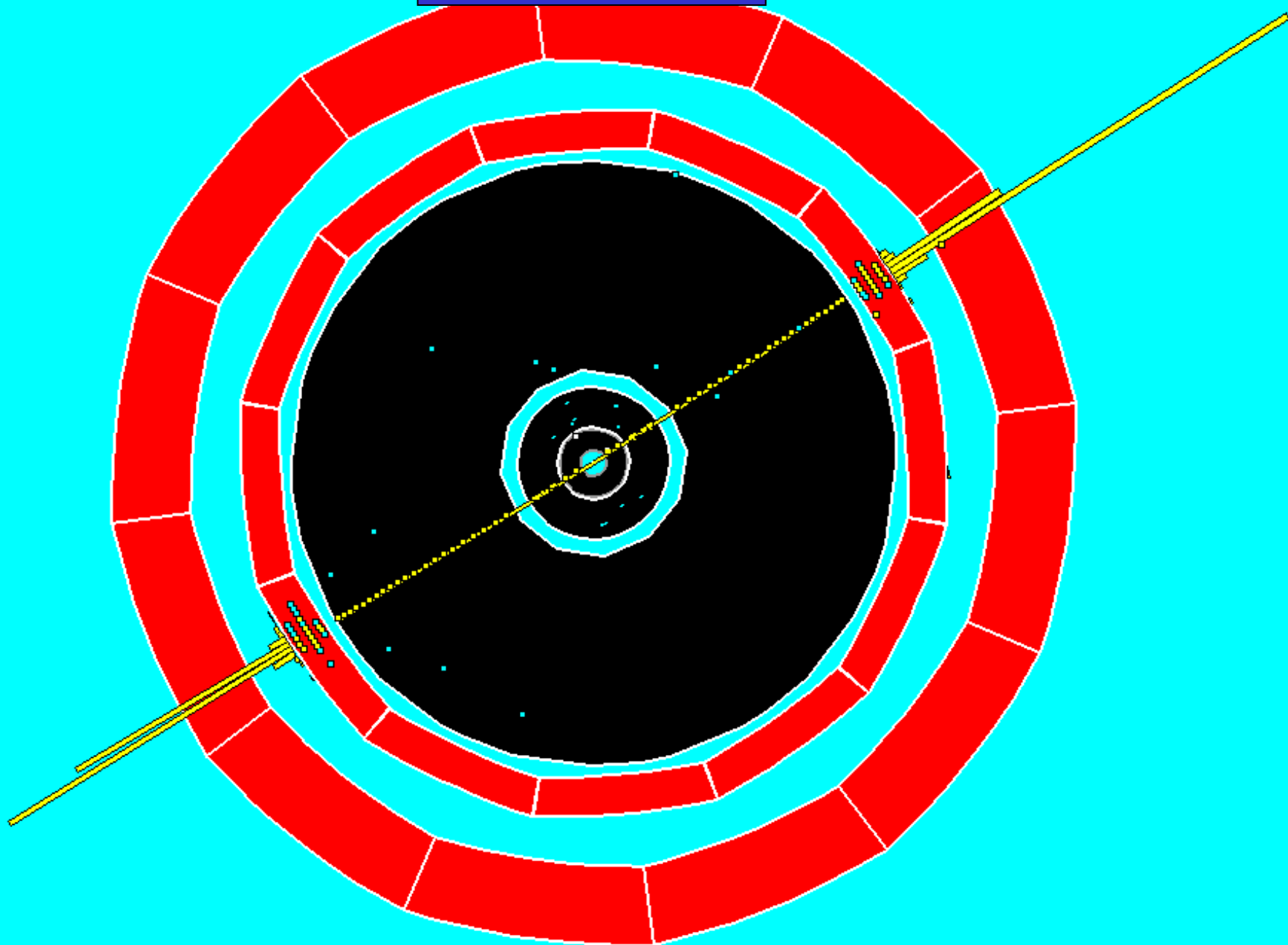
- détermination à partir de toutes les données du LEP:

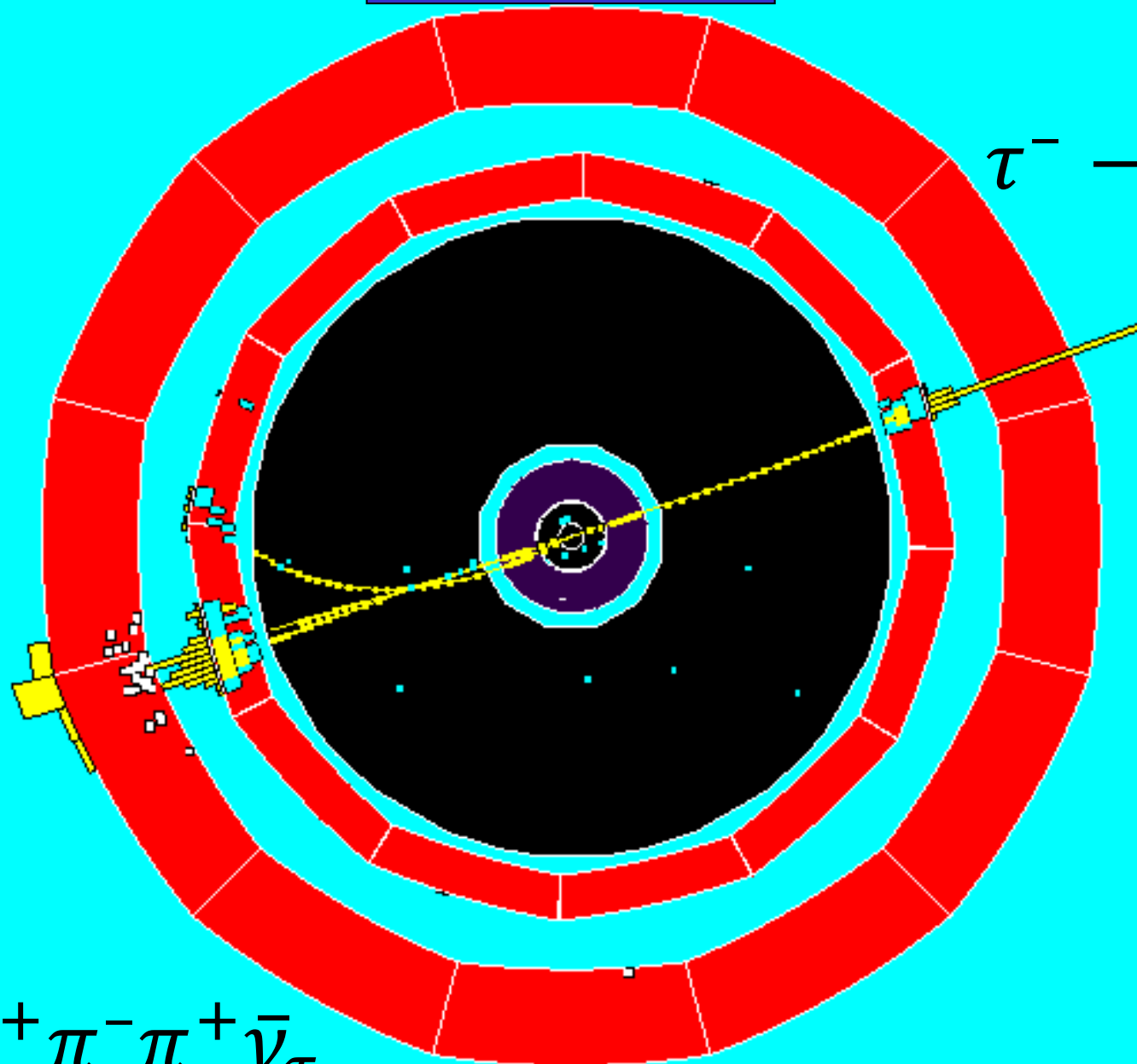
$$N_\nu = 2.9963 \pm 0.0074$$



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

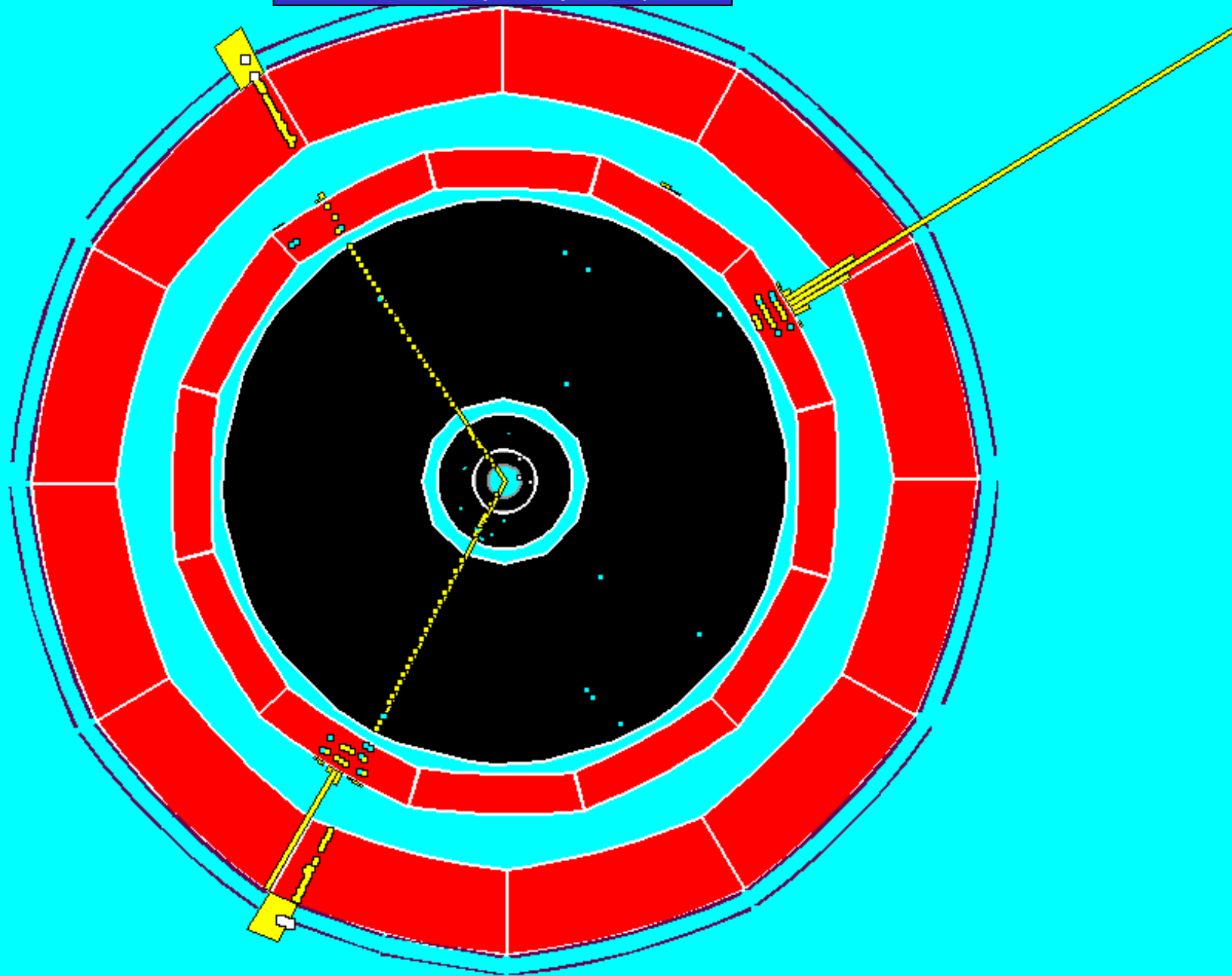


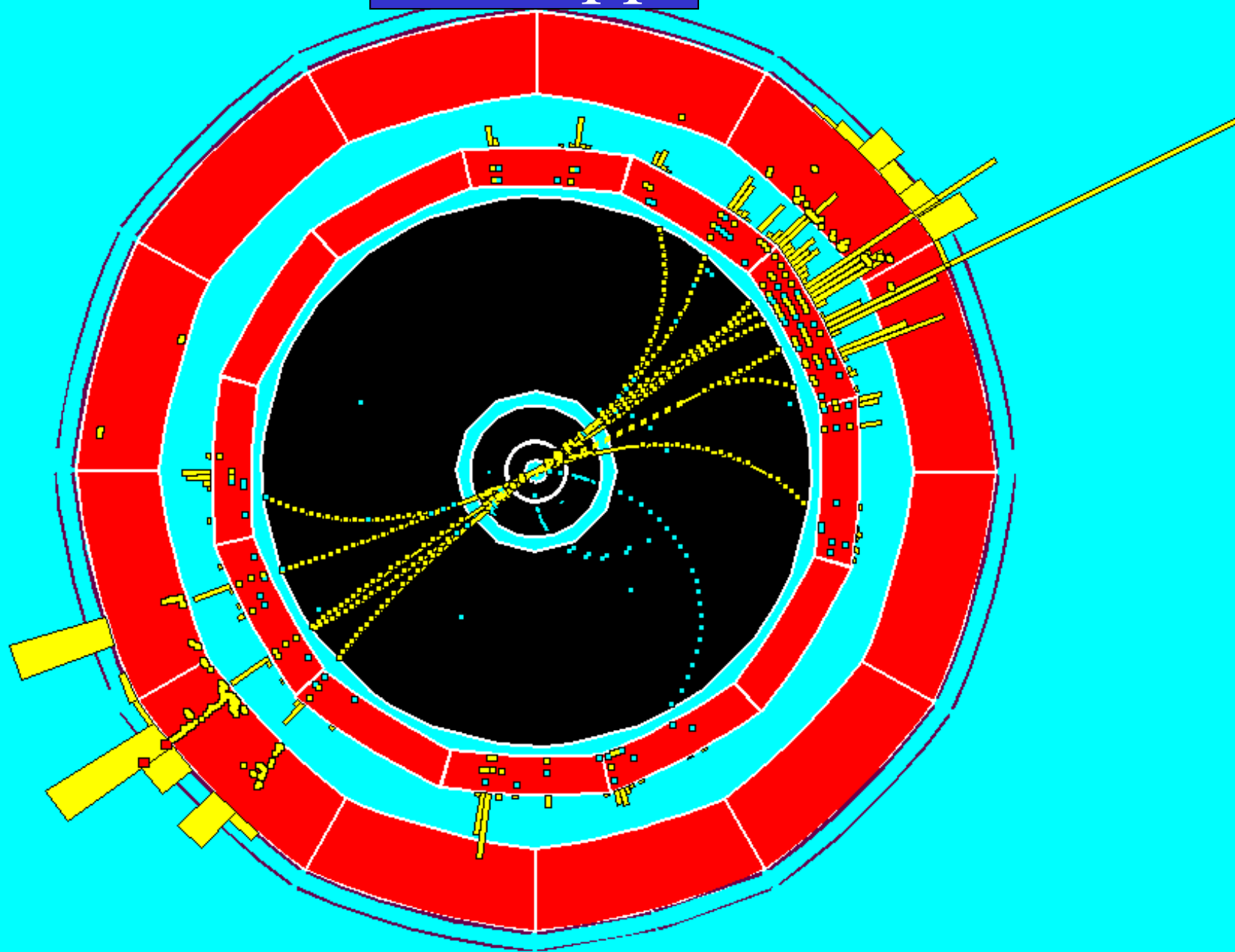


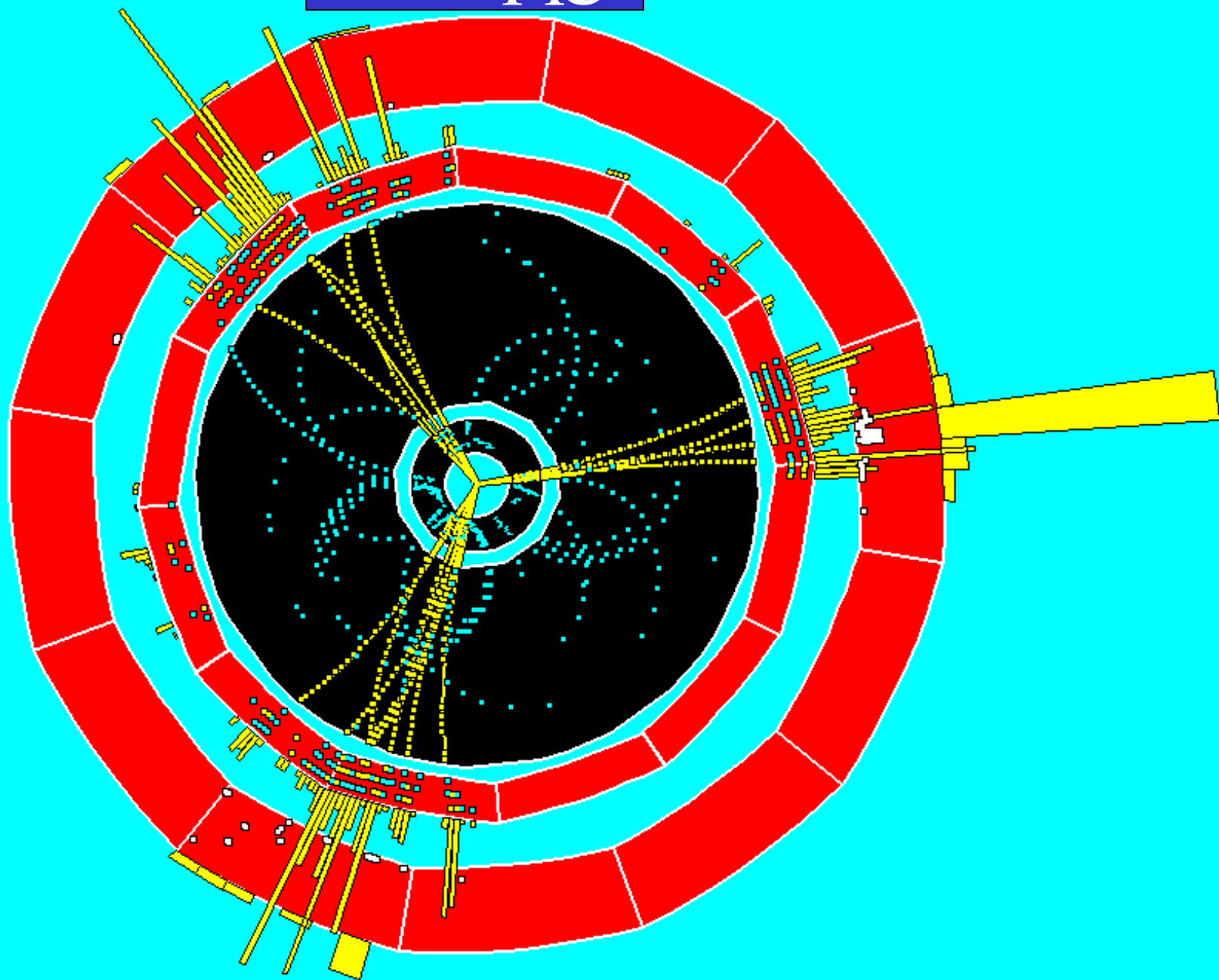


$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$

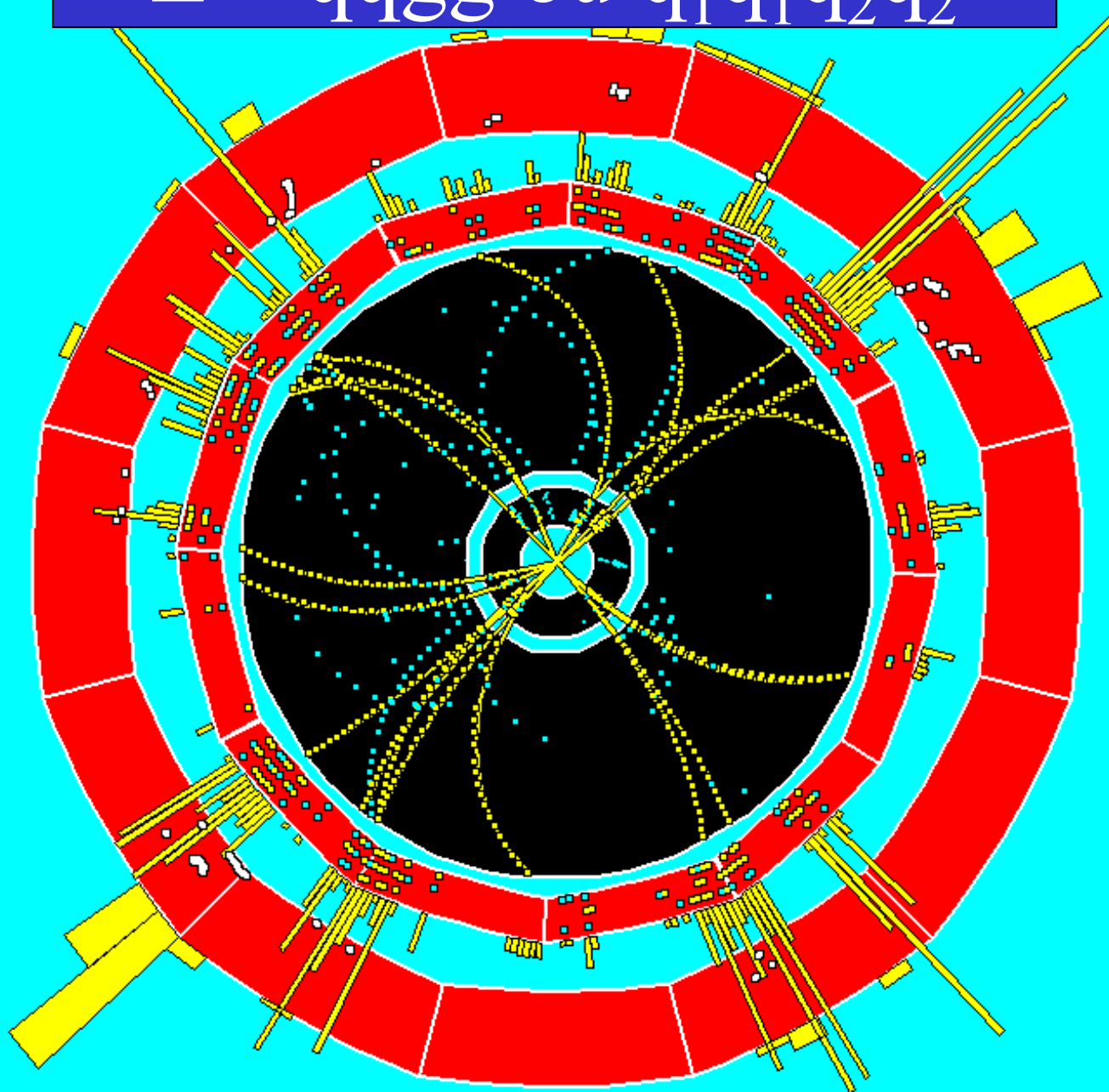
$\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \bar{\nu}_\tau$







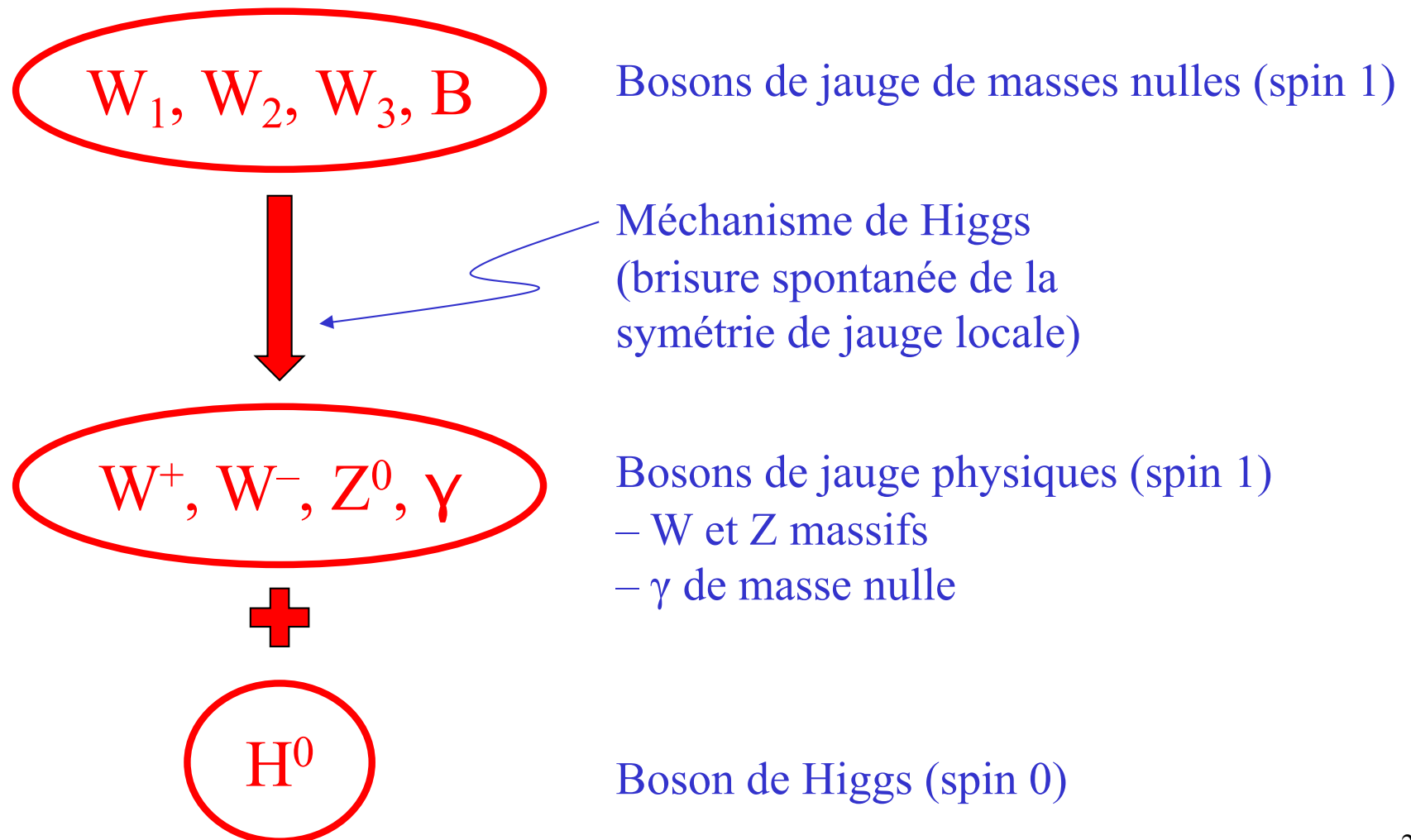




# Théorie électrofaible

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

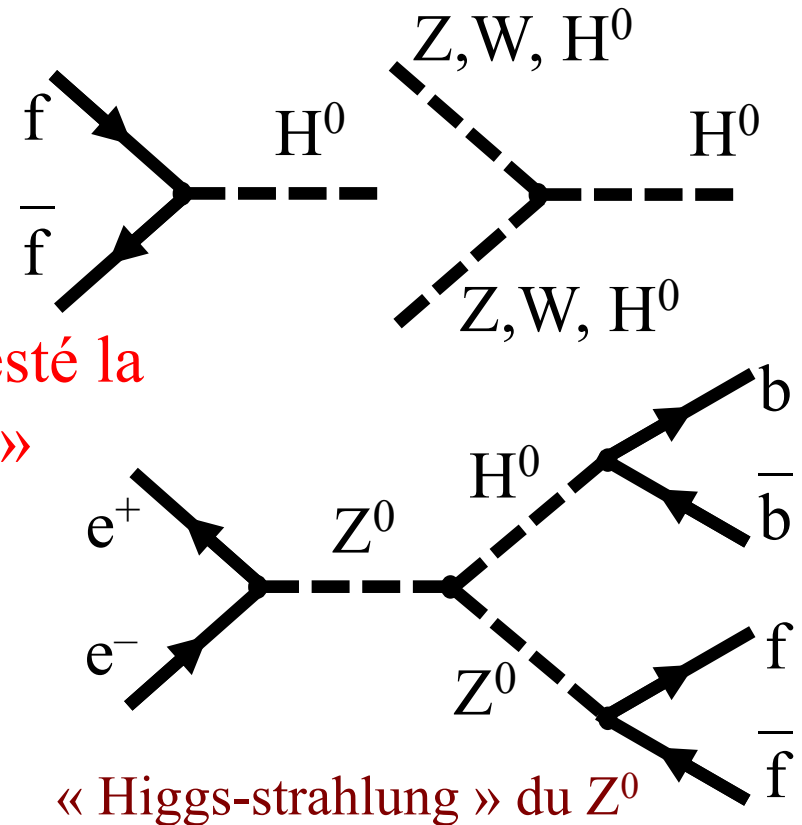
- Théorie quantique des champs  
avec invariance de jauge locale



# 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 masse<sup>2</sup> 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

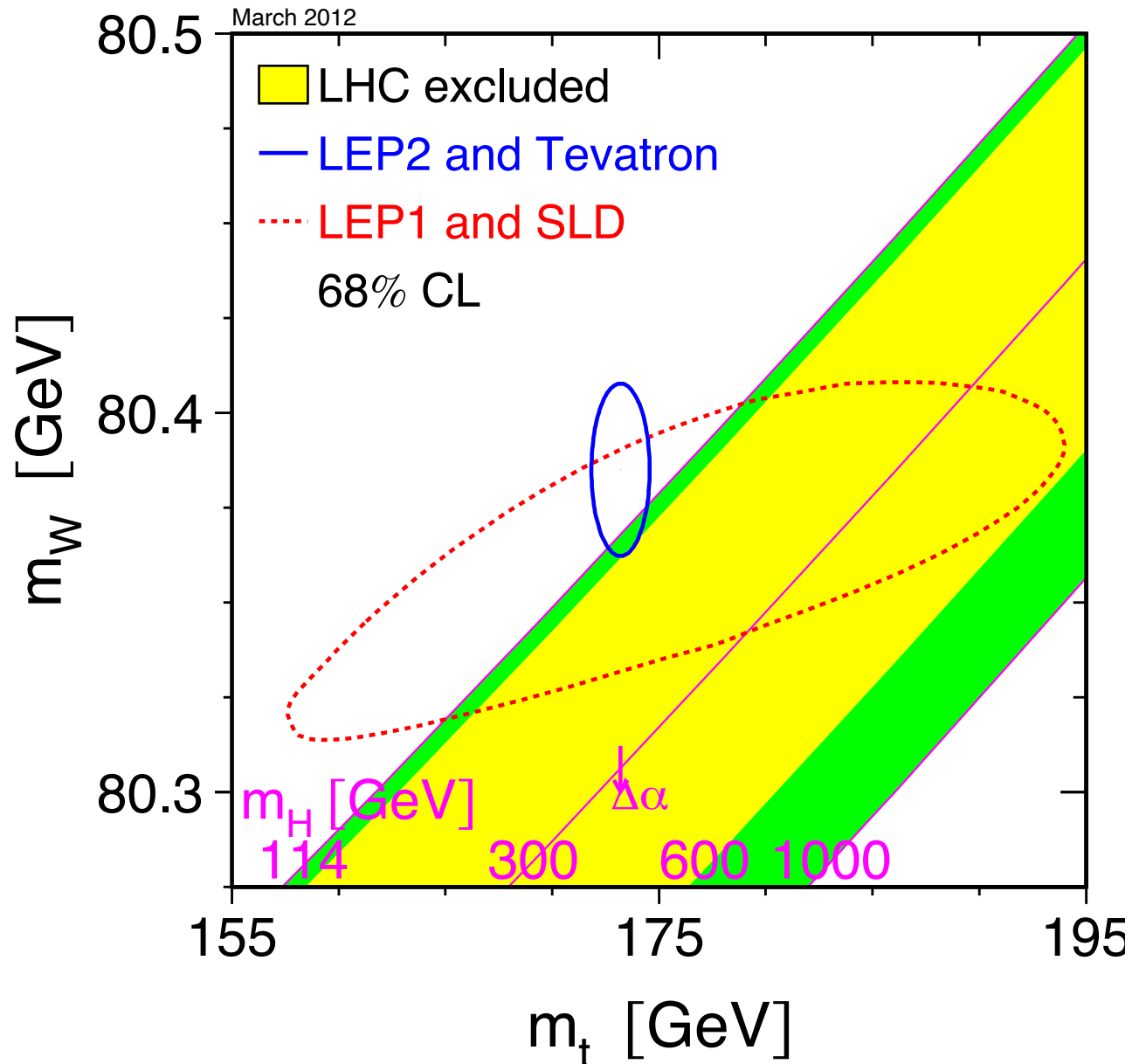
- prix Nobel en 2013 à  
François Englert et Peter Higgs

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

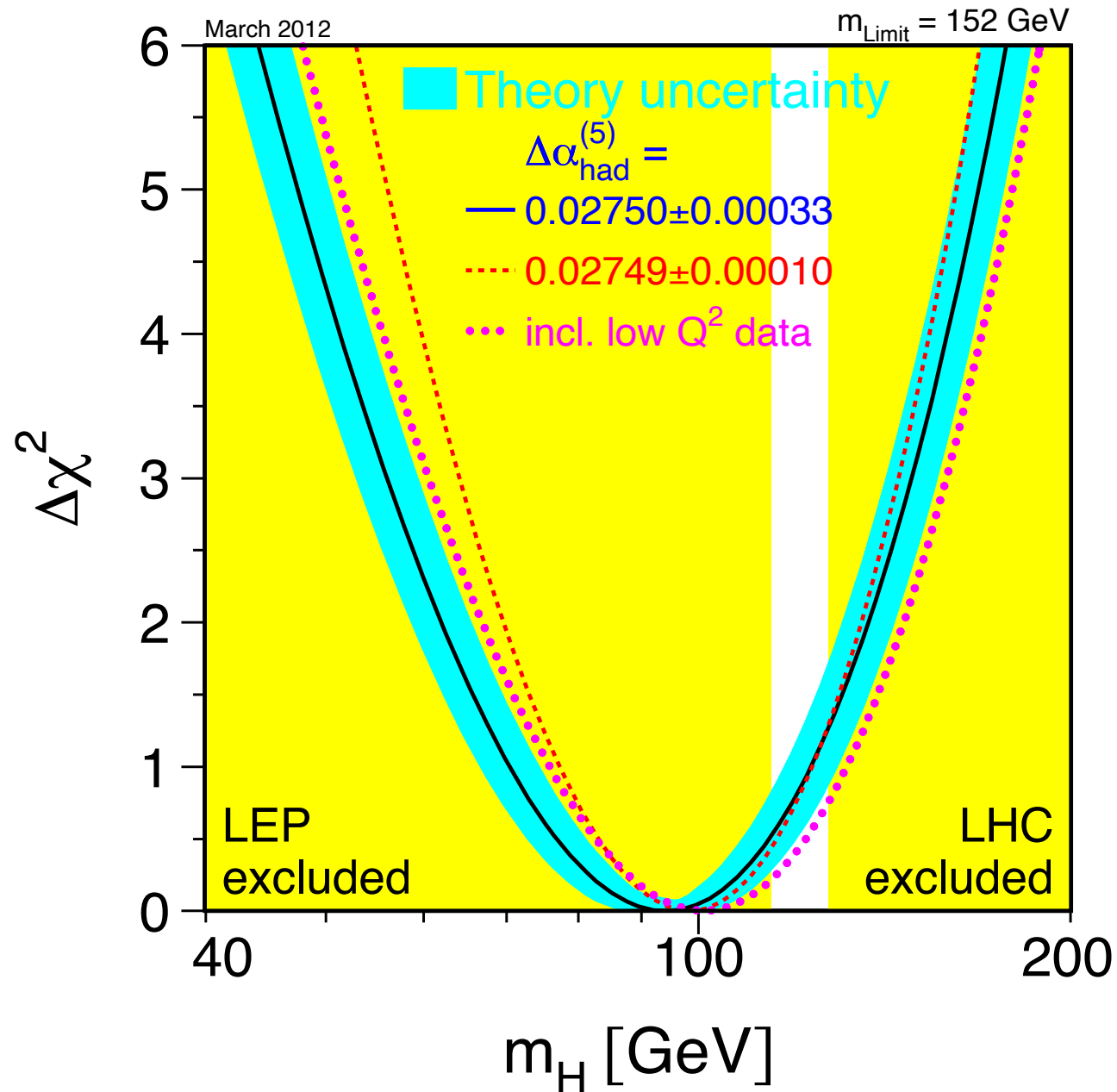
# La cohérence du modèle standard

- 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  $m_t$ :

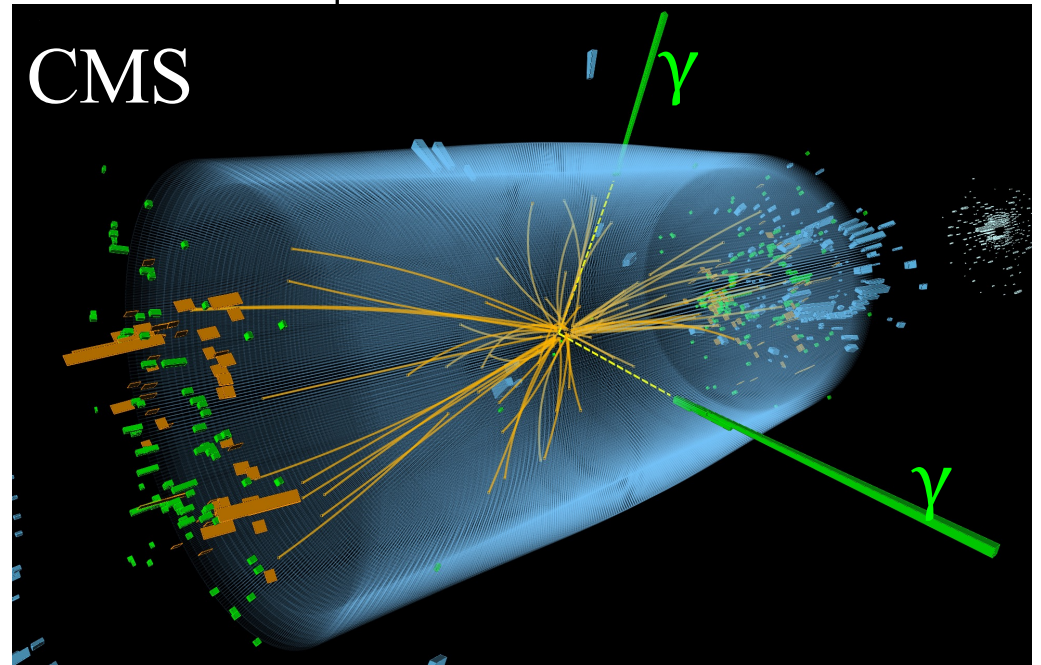
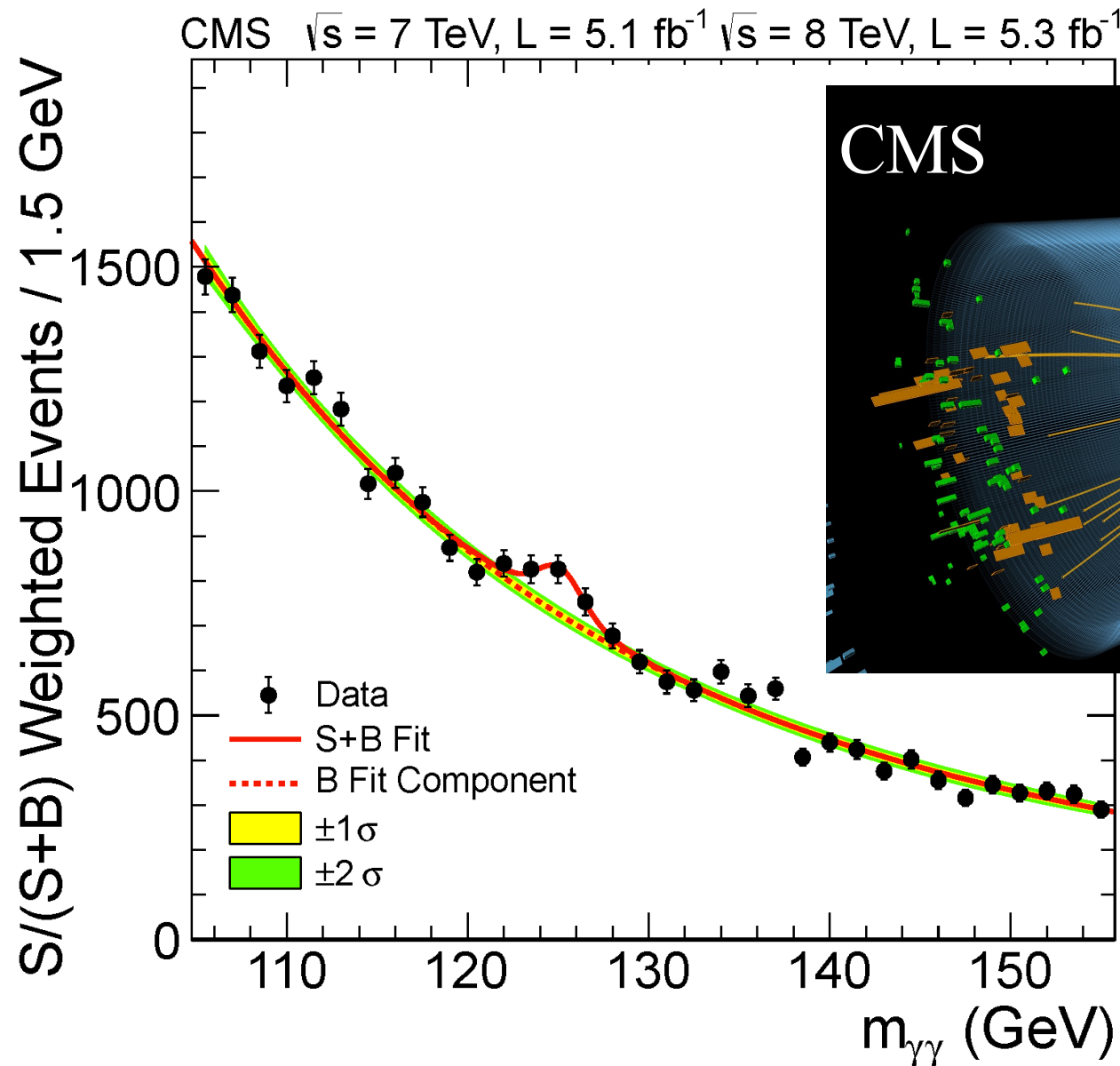
- mesures directes de  $m_W$  et  $m_t$
- autres mesures pouvant être reliées  $m_W$  et  $m_t$  dans le cadre du modèle standard
- prédiction du modèle standard pour  $m_H = 114, 300, 1000 \text{ GeV}/c^2$



# Masse du Higgs (mars 2012)

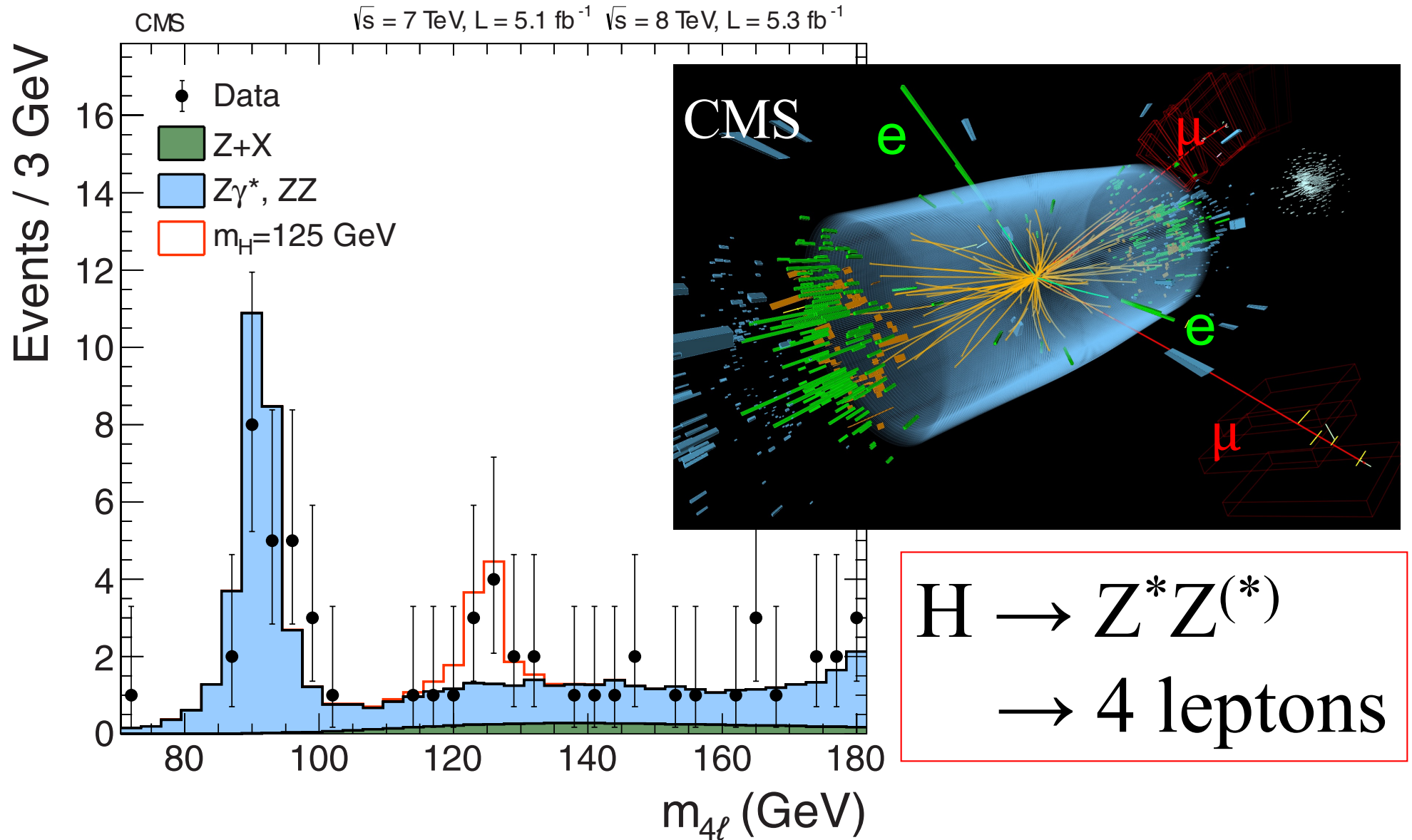


# Découverte du Higgs (2012)

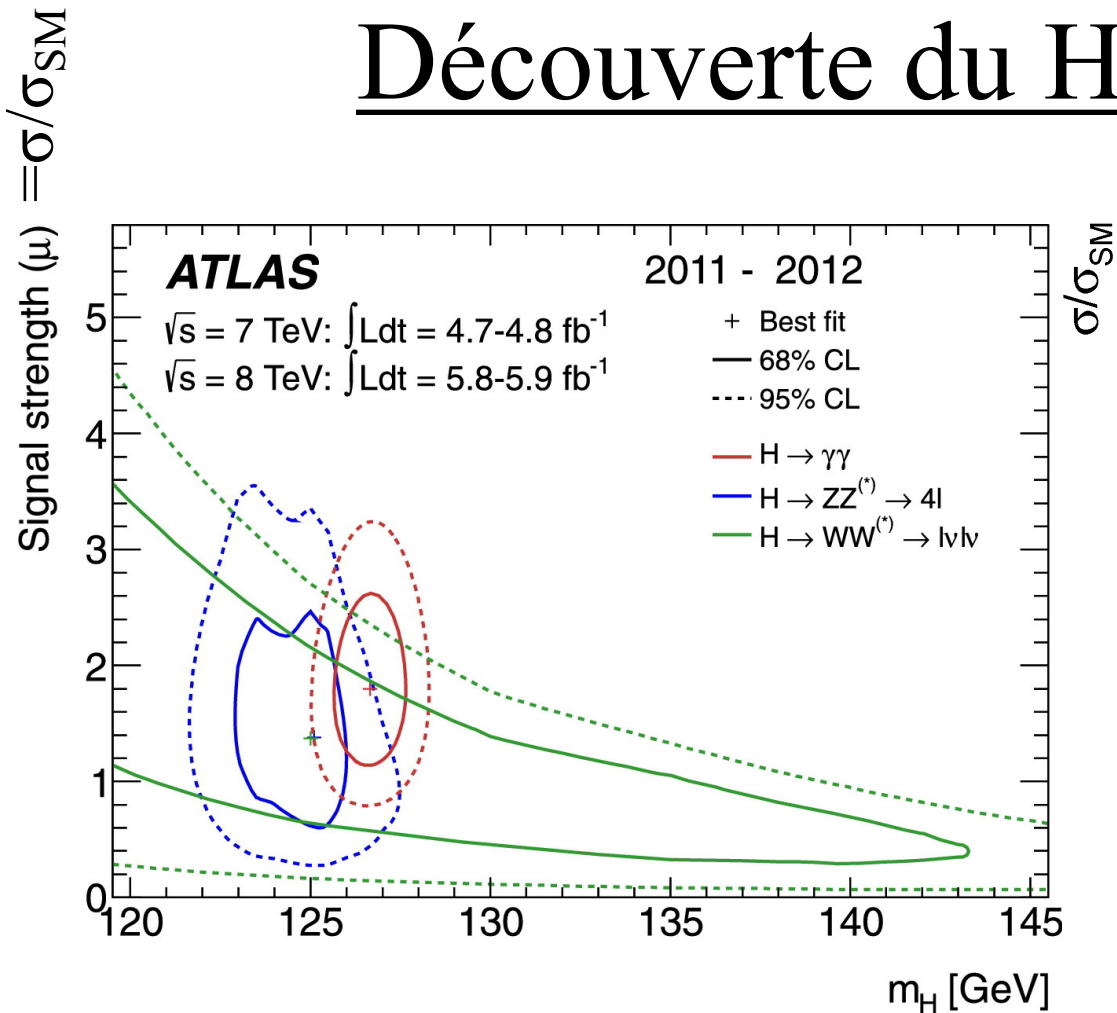


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

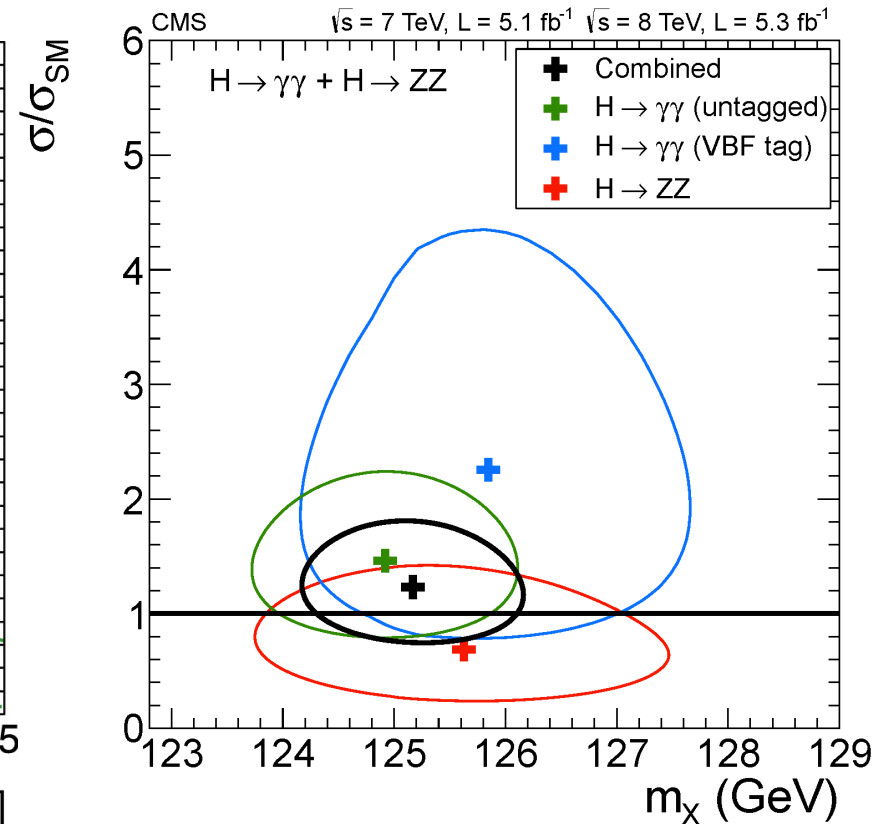
# Découverte du Higgs (2012)



# Découverte du Higgs (2012)



ATLAS, PLB 716, 1 (2012)



CMS, PLB 716, 30 (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