



# CHAMPS & PARTICULES

---

## CONFIRMATIONS DU MODÈLE STANDARD

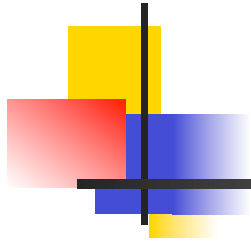


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

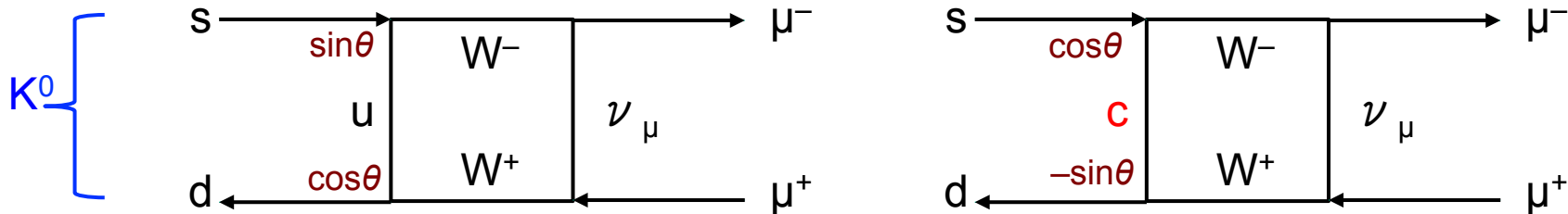




# LA RÉVOLUTION ~~D'OCTOBRE~~ DE NOVEMBRE

# Un quatrième quark ?

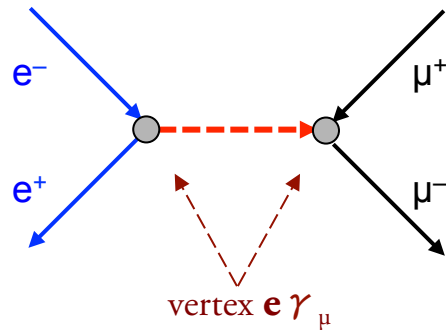
- Expérimentalement  $K^0 \Rightarrow \mu^+\mu^-$  alors que c'est théoriquement possible via



- Glashow, Iliopoulos et Maiani 1970 : un quatrième quark compenserait (presque) exactement ce diagramme
- **Autre motivation** : Adler, ainsi que Bell et Jackiw, avaient montré en 1969 que certaines symétries du lagrangien pouvaient être **brisées** par les corrections radiatives
- Cette « anomalie » était proportionnelle à la somme des charges des fermions
  - électron + neutrino + (quark u + quark d)\*3 =  $-1 + 0 + (2/3 - 1/3)*3 = 0$
  - muon + neutrino + (quark c + quark s)\*3 =  $-1 + 0 + (2/3 - 1/3)*3 = 0$
  - ➔ la compensation de l'anomalie exigeait un quark de charge 2/3
  - Après la découverte du lepton tau (1975), quark bottom (1977) et quark top (1995)

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

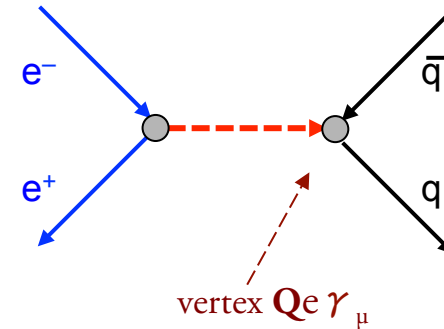
- Réaction  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  au 1<sup>o</sup> ordre



- $\Rightarrow$  amplitude  $e^2 M$   
[élément de matrice  $M$  incluant la cinématique]
- $\Rightarrow$  section efficace

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = e^4 |M|^2$$

- Hadrons = quarks  $\Rightarrow$  réaction  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  au 1<sup>o</sup> ordre



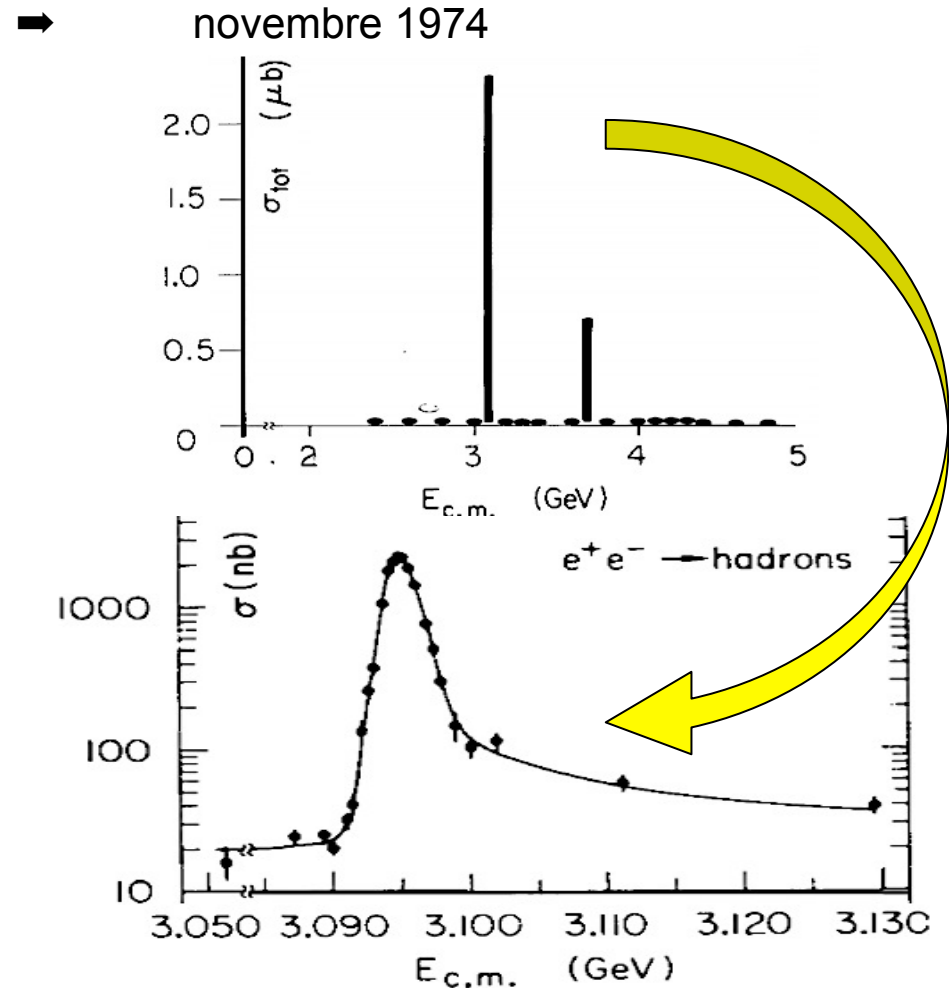
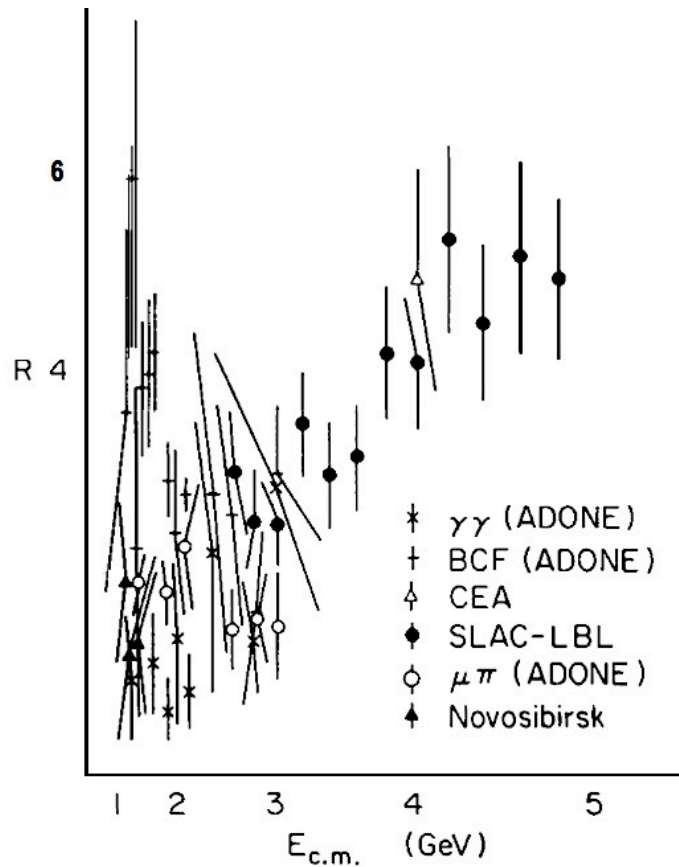
- $\Rightarrow$  amplitude  $Qe^2 M$   
[ $Q = 2/3$  pour le quark u,  $Q = -1/3$  pour d et s]
- $\Rightarrow$  sections efficaces

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}) = \sum_{\text{quarks}} Q^2 e^4 |M|^2$$

$$\Rightarrow R = \sum_{\text{quarks}} Q^2 \Rightarrow R = \text{constante} = 2/3 \quad [2 \text{ avec la couleur}]$$

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

- Modèle des quarks  $\Rightarrow R = \sum_{\text{quarks}} Q^2 = 2/3$  [ou 2 avec la couleur] *hors résonances*
- Juillet 1974 : confusion  $\rightarrow$  novembre 1974



# Les découvertes du $J/\psi$

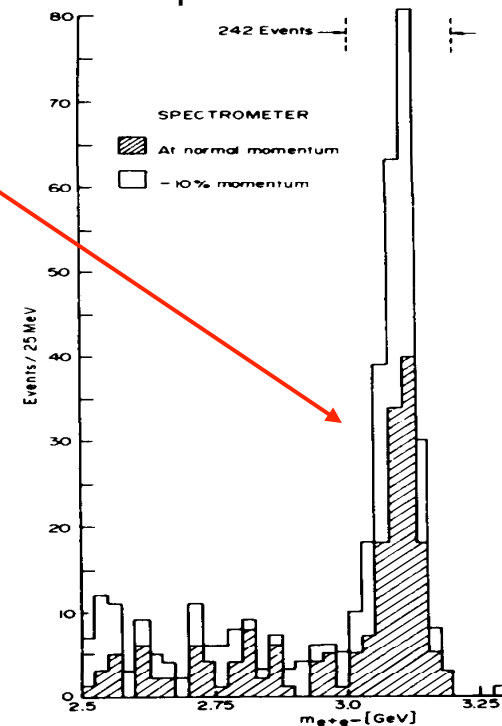
- Burton Richter (à SLAC)
  - bizarreries des sections efficaces  $e^+e^-$  autour de  $2 \times 1.5$  GeV à Frascati (AdA puis Adone)
  - collisionneur  $e^+e^-$  SPEAR au SLAC (1972) :  $3+3$  GeV
  - mesure minutieuse de la section efficace par très petits pas en énergie
  - → résonances **très étroites** :  $\psi$  à 3.097 puis  $\psi'$  à 3.686 GeV

┐ ■ Samuel Ting (à Brookhaven) : découverte simultanée d'une particule de 3.1 GeV par mesure de la masse invariante  $e^+e^-$

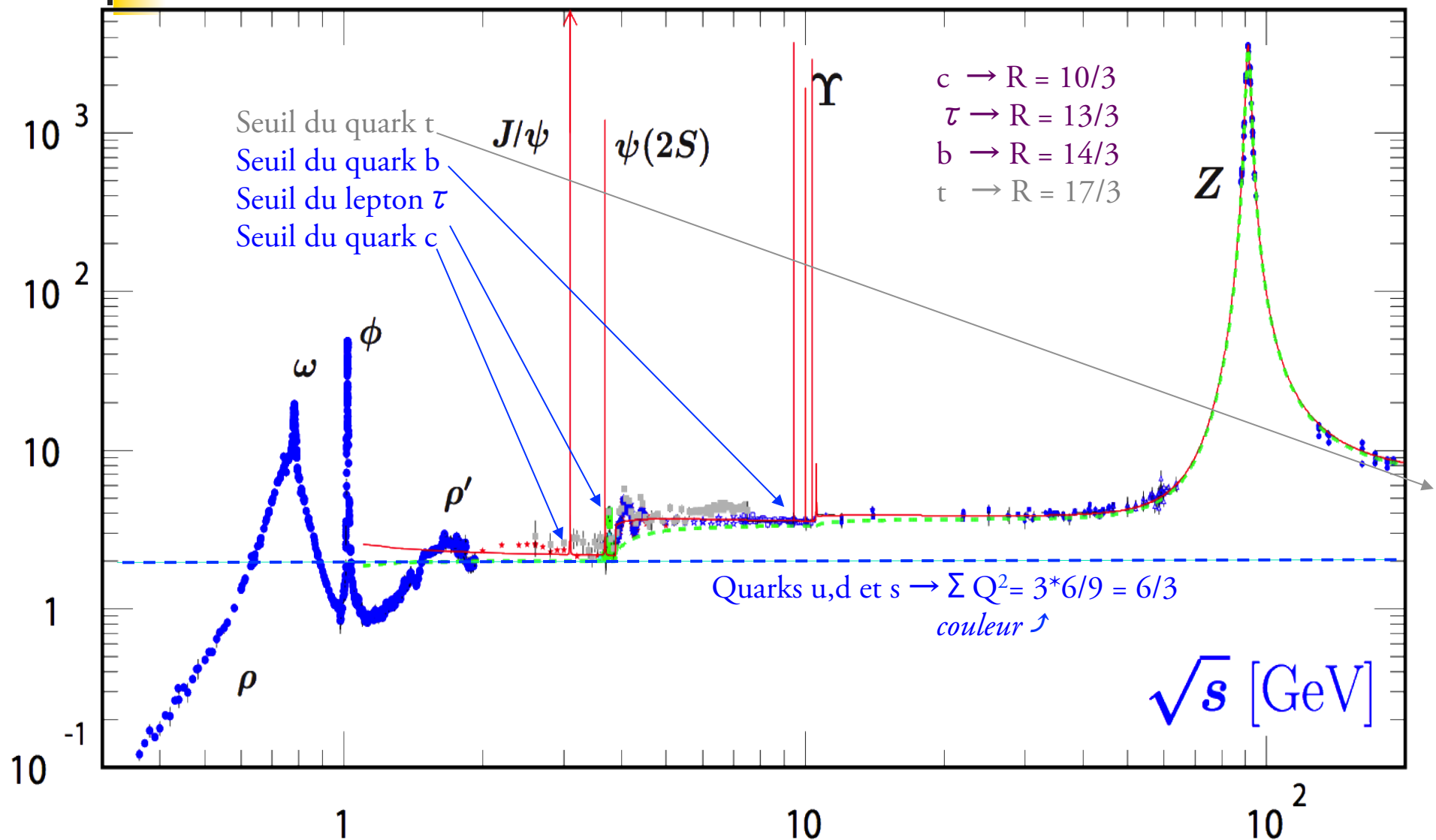
■ Interprétation : méson  $c\bar{c}$

■ Puis ensuite

- autres mésons  $c\bar{c}$  ( $\psi'$ ,  $\psi''$ ... = *charmonium*)
- mésons D ( $\bar{u}c$ ,  $\bar{d}c$ ) et  $D_s$  ( $\bar{s}c$ )
- baryons charmés  $\Lambda_c$  ...



$$R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \sum_{\text{quarks}} Q^2$$

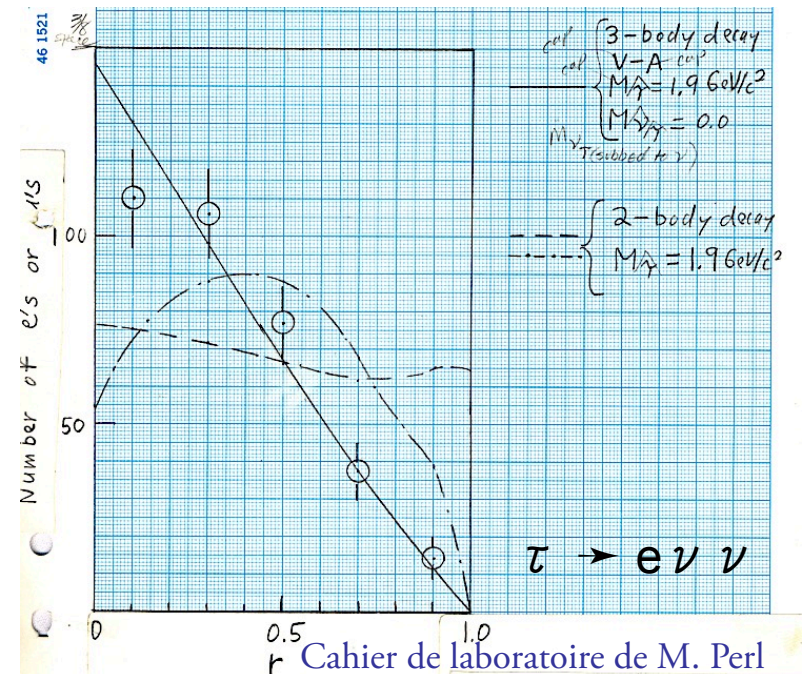


# Après le muon, encore un lepton non prévu !

- Toujours à SLAC-SPEAR, Martin Perl et ses collaborateurs avaient en 1974 d'autres événements bizarres : « nous avons découvert 64 événements de la forme  $e^+ + e^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp +$  au moins deux particules non détectées pour lesquels nous n'avons pas d'explication conventionnelle »

- ➔ suggestion :  $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + 4\nu$

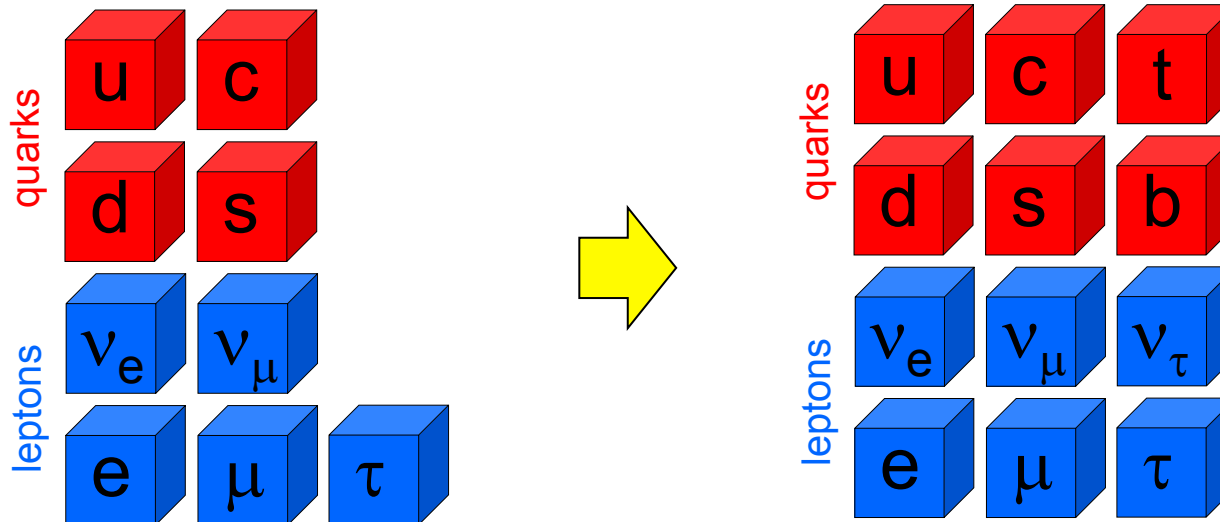
- où le  $\tau$  est un (troisième) lepton, de masse  $1776.82 \pm 0.16$  MeV
  - le symbole  $\tau$  [et ensuite le nom *tau* ou *tauon*] vient du mot τρίτον (le troisième)
- Controverse initiale
  - car le seuil de production est très proche de celui des mésons charmés D à 1865 MeV
  - résolue par la mesure d'un spin  $\frac{1}{2}$  pour le  $\tau \Rightarrow$  ce n'est pas un méson





# Encore un lepton non prévu !

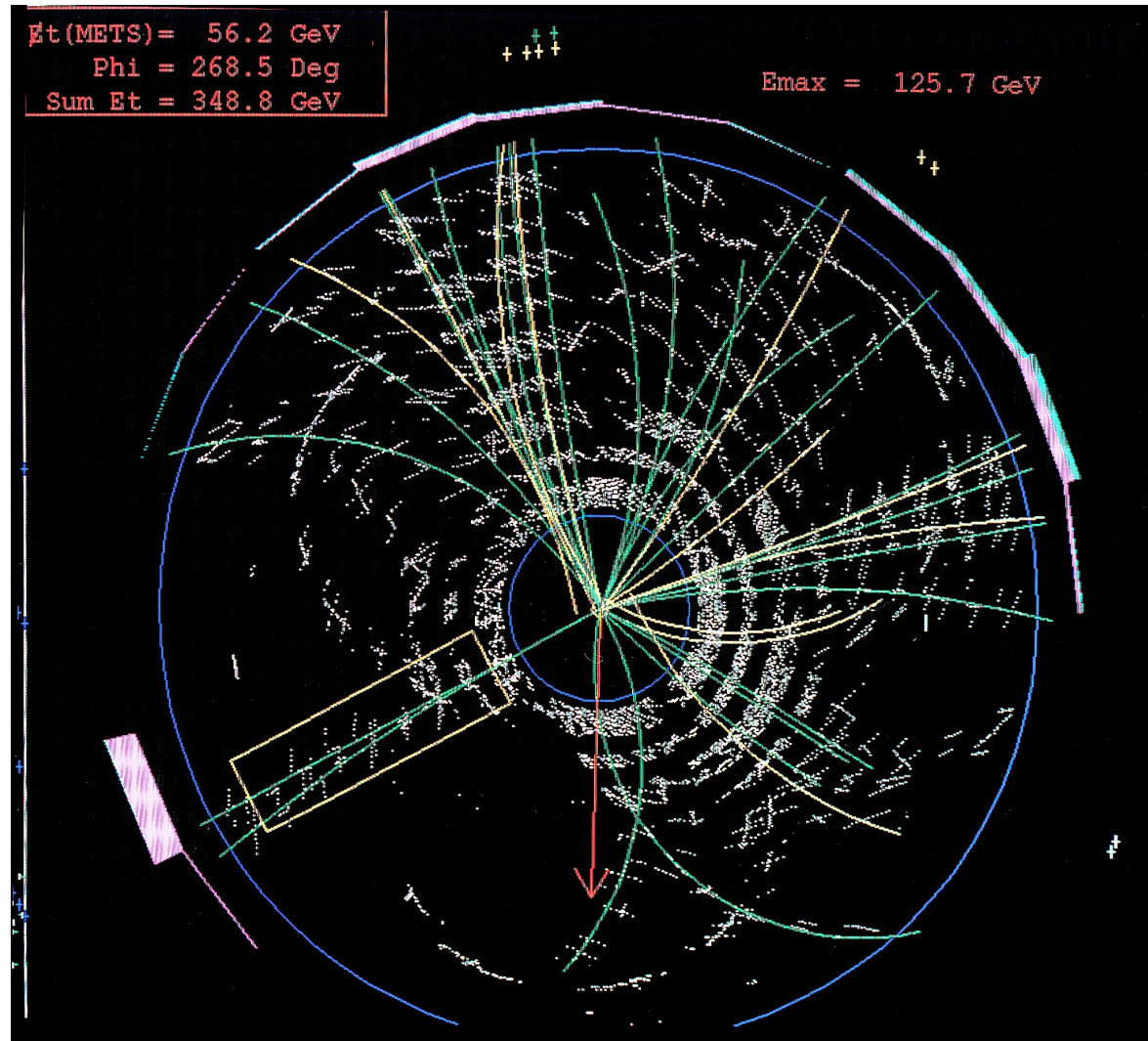
- Mais un lepton  $\tau$  analogue au muon et à l'électron  $\rightarrow$  neutrino  $\nu_\tau$  associé ?
- Et probablement un **nouveau doublet de quarks** pour compléter la famille (et corriger l'anomalie d'Adler-Bell-Jackiw)
- 1977 : découverte du  $\Upsilon$  (upsilon)
  - méson  $b\bar{b}$  de masse 9.46 GeV
  - puis autres mésons  $b\bar{b}$
  - puis autres mésons  $u\bar{b}$ ,  $d\bar{b}$ ,  $s\bar{b}$ ,  $c\bar{b}$ , et baryons contenant un (ou plusieurs) quark b



## Et finalement le quark *top* (1995)

- Fermilab/Tevatron/CDF
- Paire top-antitop
- →  $m_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}$

- → 3 paires de quarks
  - u et d
  - c et s
  - t et b
- et 3 paires de leptons
  - e et  $\nu_e$
  - $\mu$  et  $\nu_\mu$
  - $\tau$  et  $\nu_\tau$

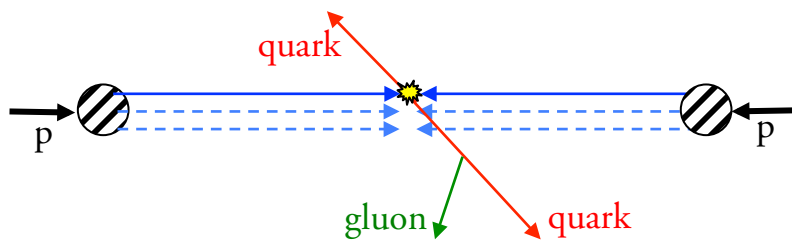


# Jets

- Montée en énergie  $\Rightarrow$  le nombre total de particules produites dans une collision augmente

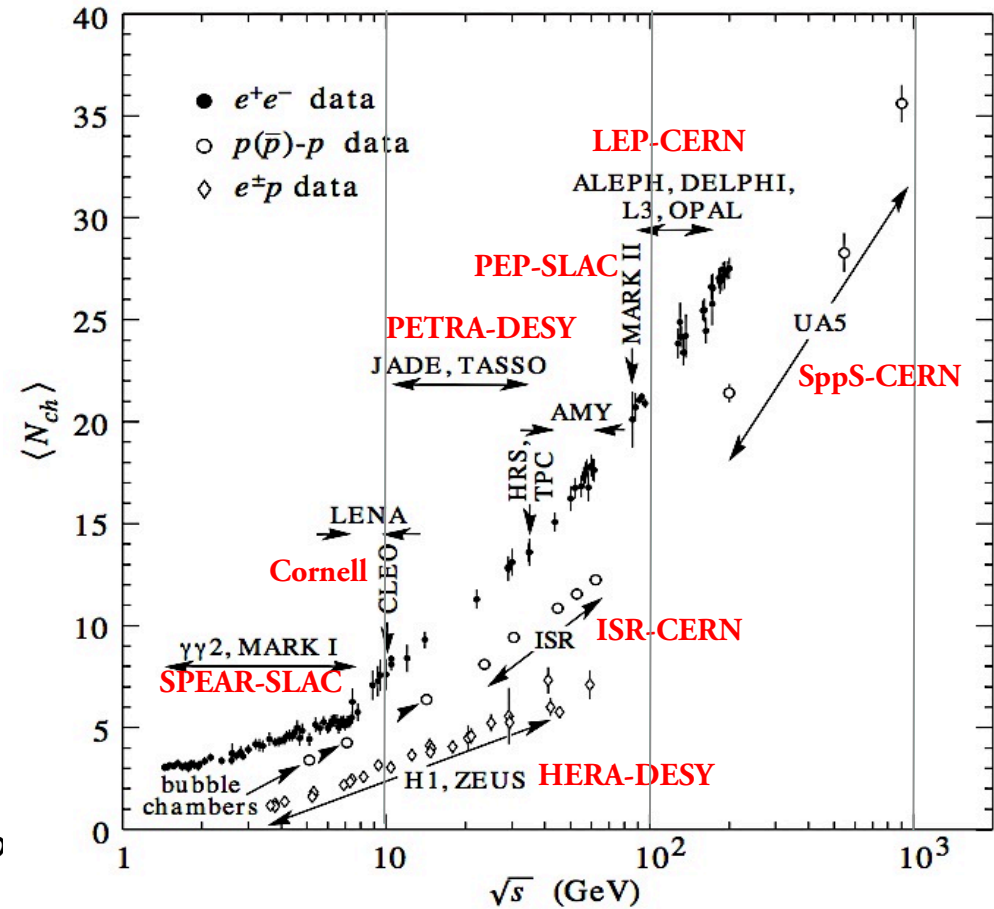
- Modèle des quarks

- production initiale de 2 quarks
- qui « s'habillent »
- $\Rightarrow$  2 jets de particules
- $\pm$  dos à dos

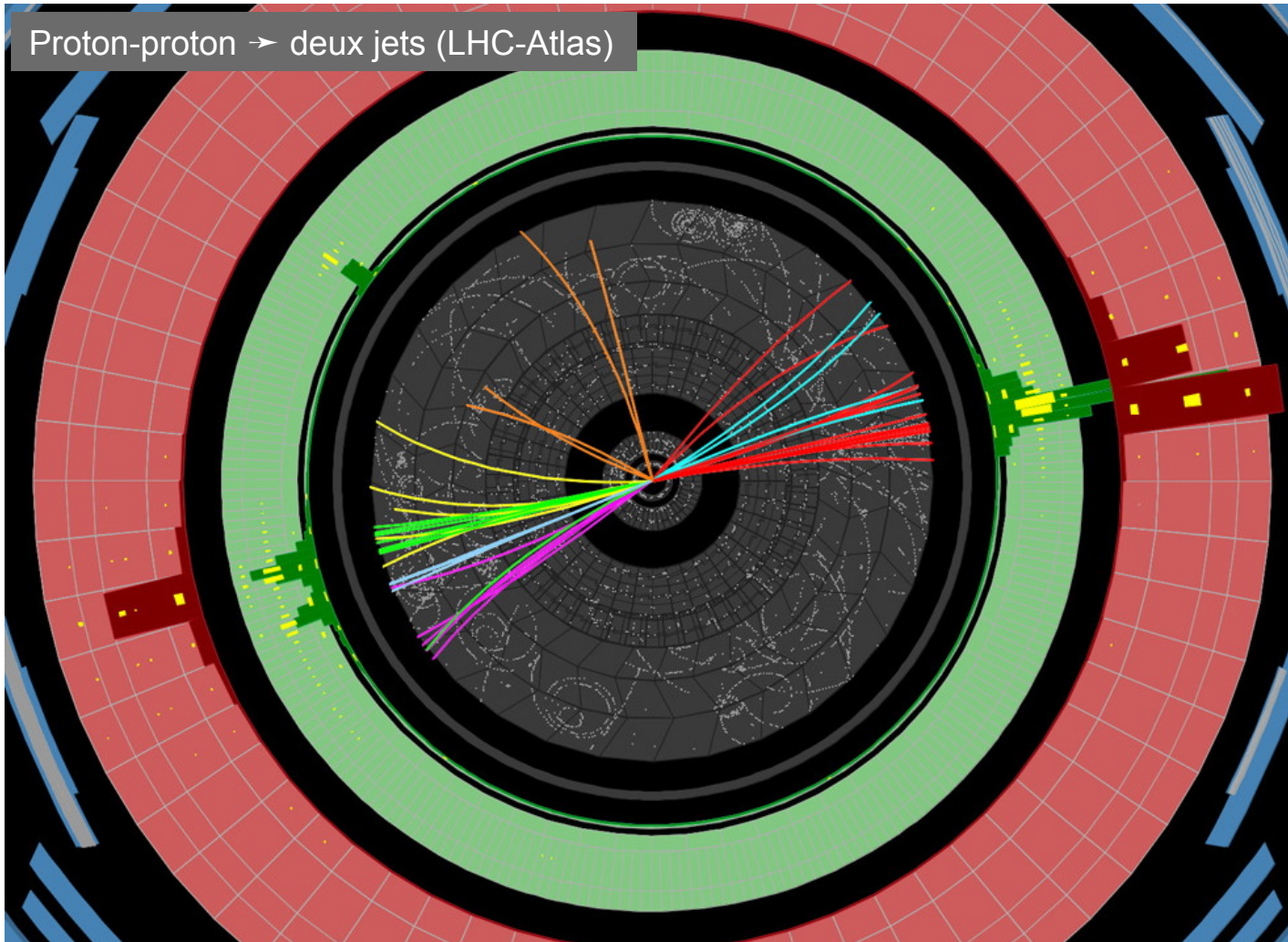


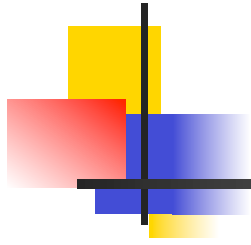
- QCD

- production de gluons
- qui « s'habillent »
- $\Rightarrow$  3 jets coplanaires de particules
- observés en 1979 par *Jade* et *Tasso*



# Jets





# LES BOSONS W ET Z



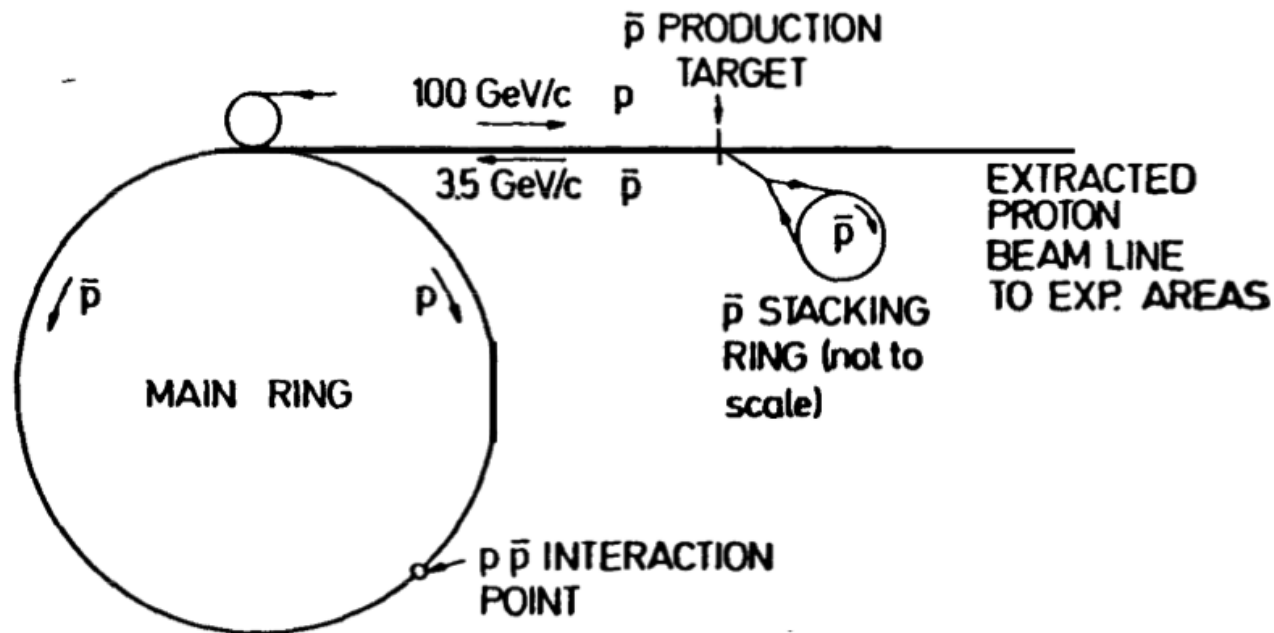
Simon van der Meer



Carlo Rubbia

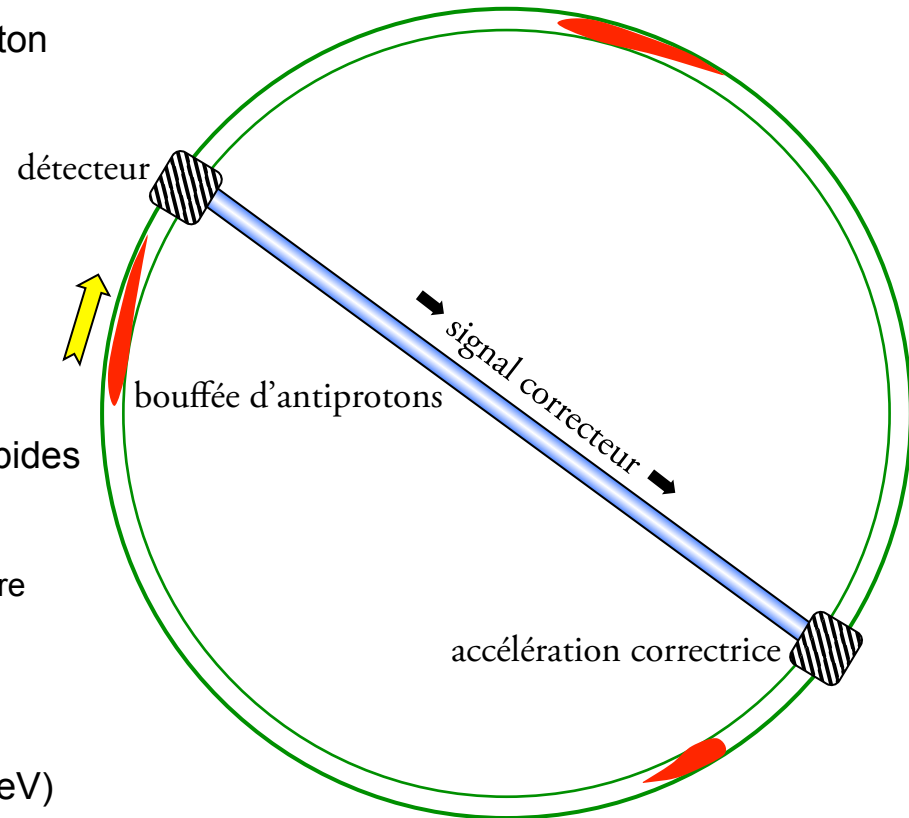
# Collisions proton-antiproton

- Idée de base : collisions à une énergie suffisante (dans le centre de masse) pour matérialiser des W et des Z
- 1976 : seulement possible avec les protons de 400 GeV du SPS (Cern) ou du Tevatron (Fermilab)
- Modification du SPS avec 2 faisceaux de 270 GeV en sens inverse



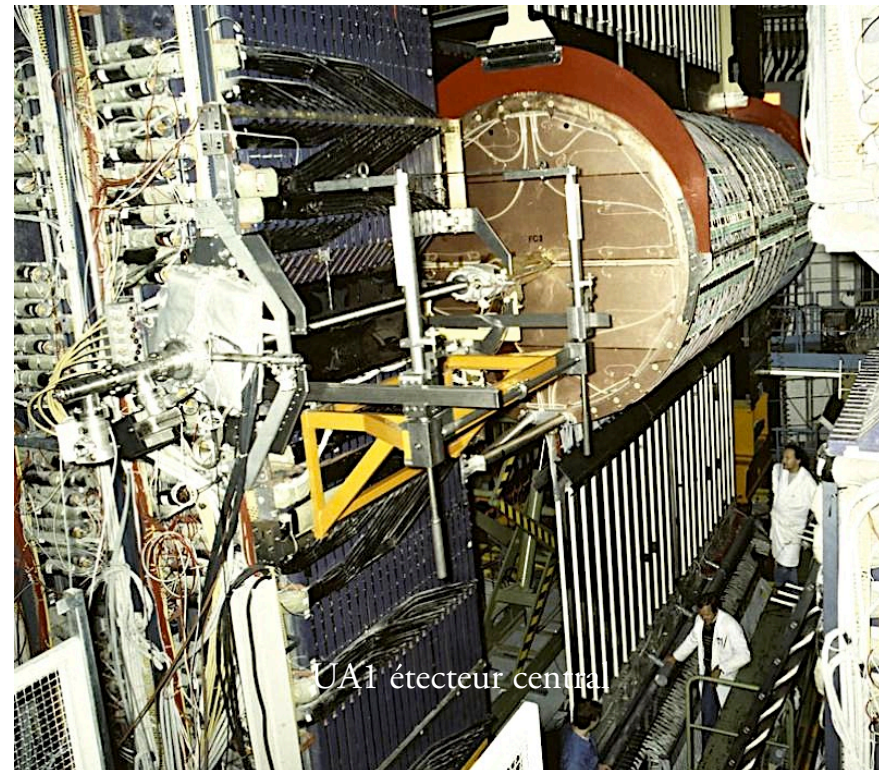
# Refroidissement stochastique des antiprotons

- Difficulté : les antiprotons (produits par collision de protons) ont une grande dispersion de vitesse ( $\Leftrightarrow$  ils sont « chauds »)
  - faible taux de collision antiproton-proton
  - énergie de la collision imprécise
- Simon van der Meer
  - remarqua que  $\pi > 2$
  - idée de corriger la dispersion ( $\Leftrightarrow$  « refroidir » les antiprotons)
  - en accélérant les lents et freinant les rapides
    - détecter leur vitesse
    - transmettre l'information via le diamètre
    - pendant que les antiprotons font le tour
  - puis répéter l'opération
  - avant d'extraire les antiprotons (à 3.5 GeV)
  - et de les injecter dans le SppS pour les accélérer à 270 GeV



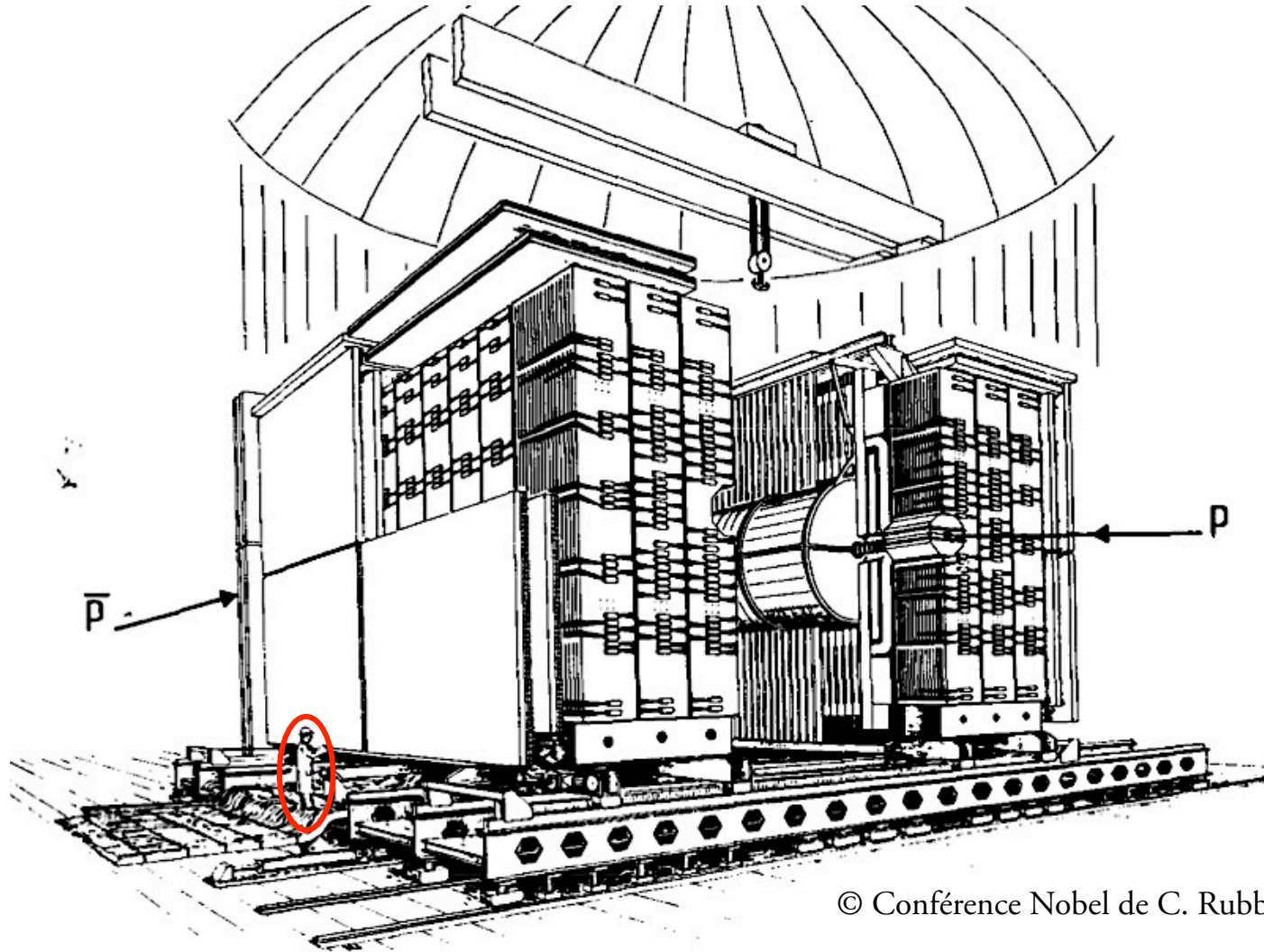
## UA-1 et UA-2

- Deux détecteurs furent installés autour du tube de l'accélérateur
- UA-1 [Rubbia]
  - détecteur central cylindrique (6 m de long, 2 m de diamètre) : chambres à fils
  - entouré de calorimètres hadroniques et de détecteurs de muons
- UA-2 [Darriulat]
  - plus spécialisé (pas de mesure de la charge, pas de détection de muons)
  - mais **plus précis**
  - ➔ permet de « contrôler » UA-1
- 1983
  - découverte de  $W \rightarrow e \nu$
  - ➔  $m_W = 80.4 \text{ GeV}$
  - puis découverte de  $Z^0 \rightarrow e^+e^-$
  - ➔  $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$





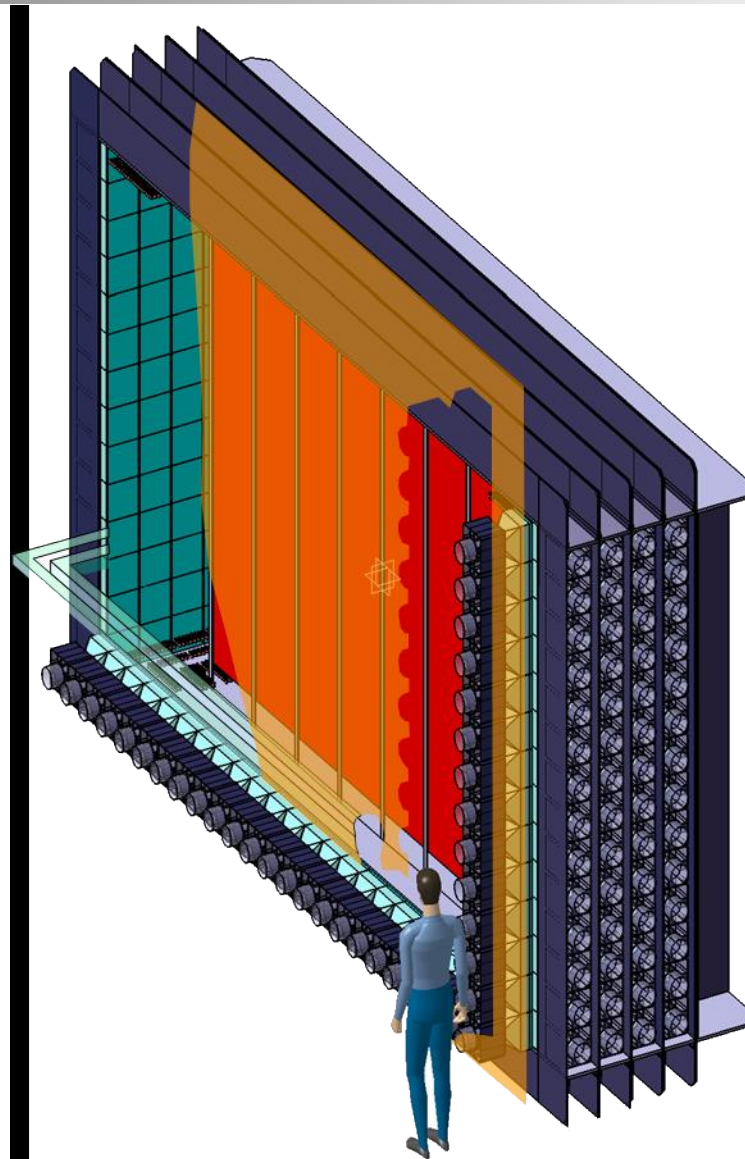
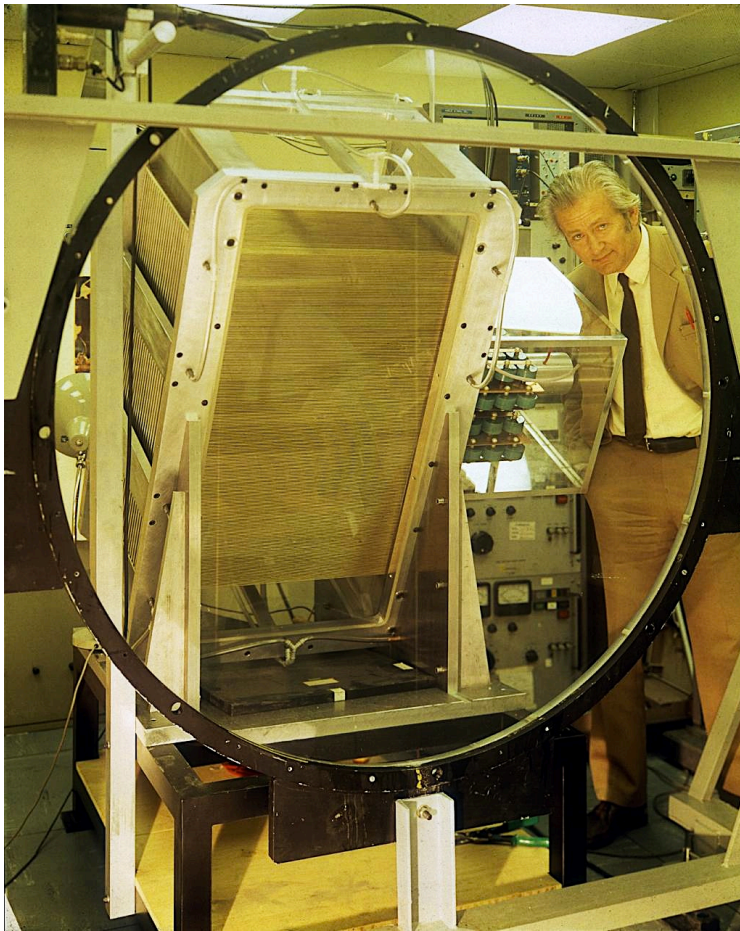
# UA-1



© Conférence Nobel de C. Rubbia (1984)

# Chambre multifils proportionnelle

- Georges Charpak (1968)

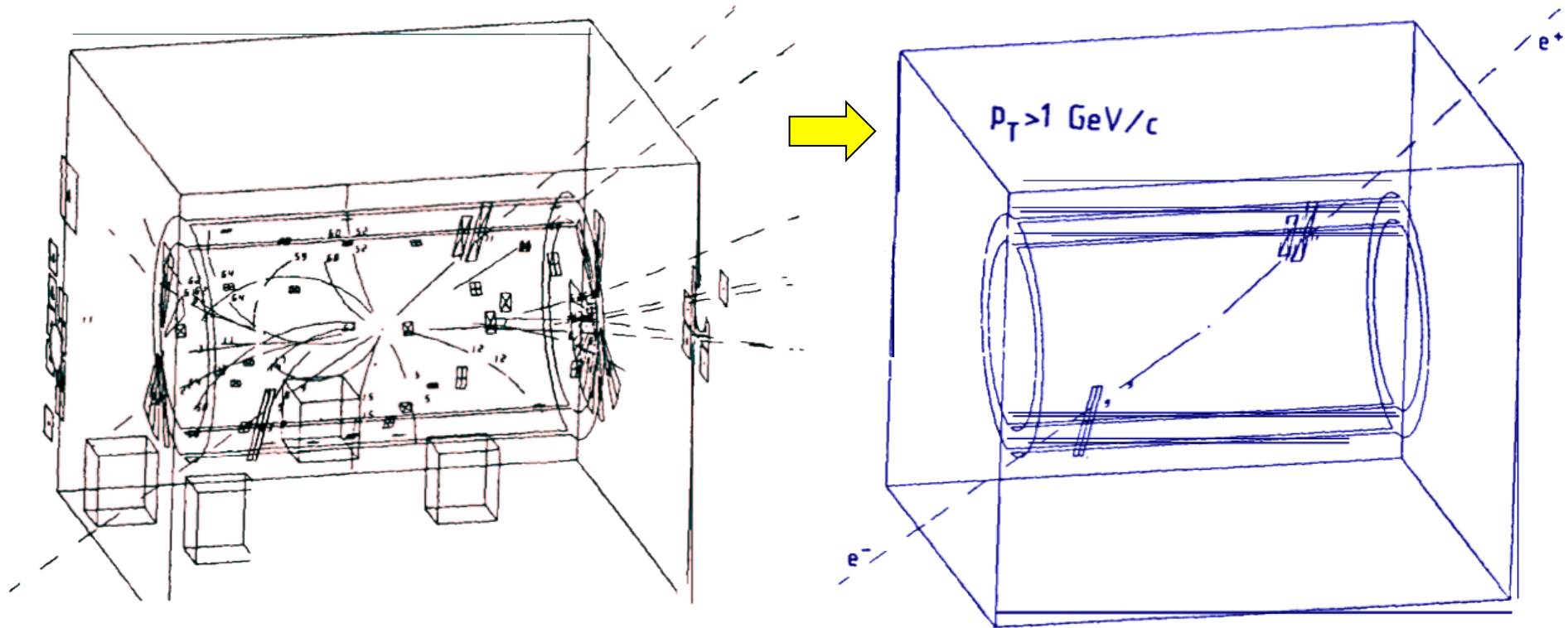


$W \rightarrow e \nu$  dans UA-1

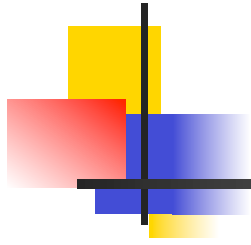


## $Z^0 \rightarrow e^+e^-$ dans UA-1

- Sélection des événements où un électron et un positron ont de très grandes impulsions transversales
- Élimination du bruit de fond des jets hadroniques

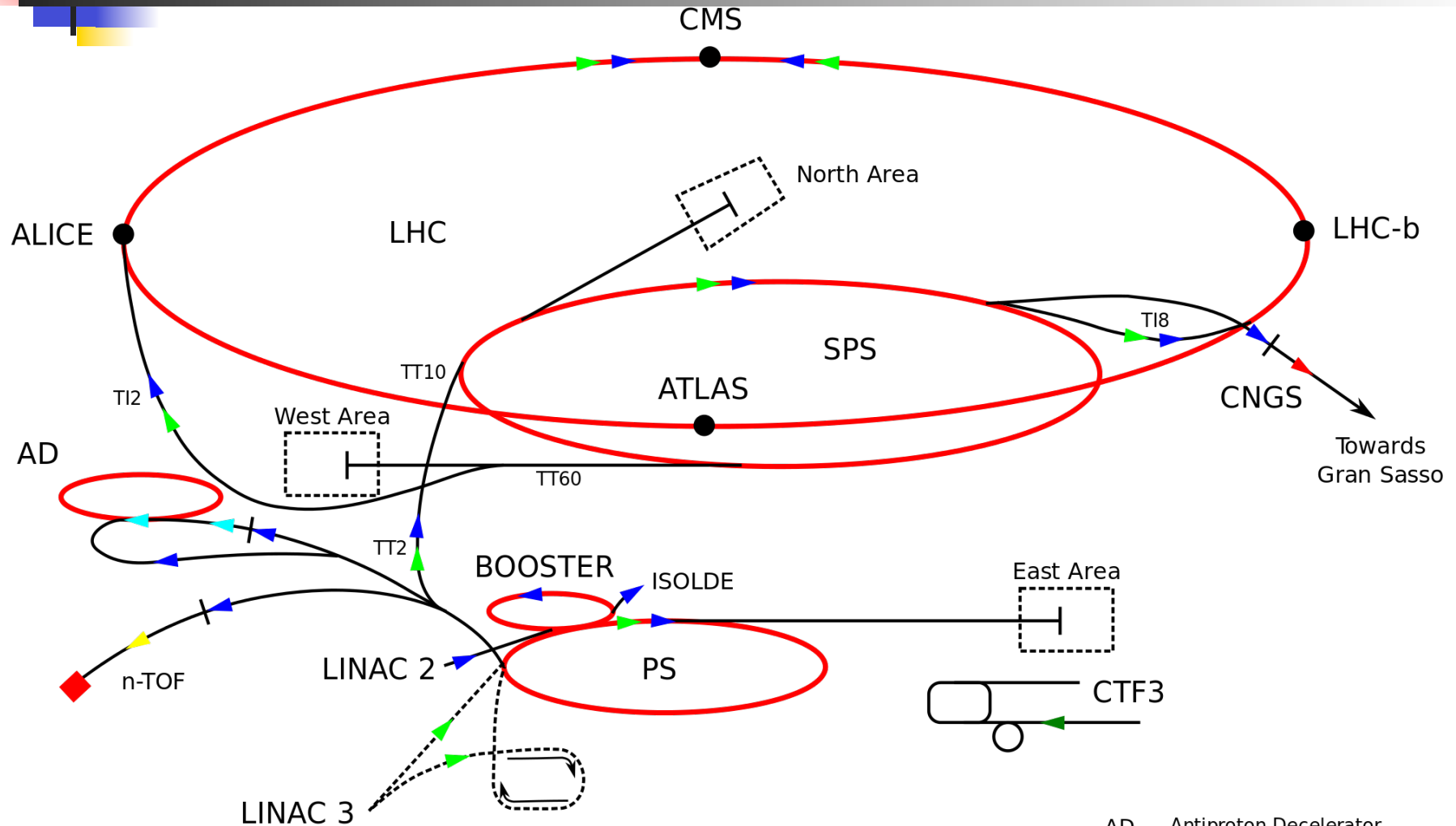


© Conférence Nobel de C. Rubbia (1984)



# LEP ET LHC

# Les accélérateurs du CERN (en 2013)



- ▶ protons
- ▶ ions
- ▶ neutrons
- ▶ antiprotons
- ▶ electrons
- ▶ neutrinos

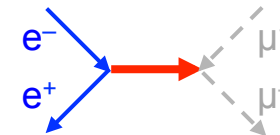
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider

- AD Antiproton Decelerator
- n-TOF Neutron Time Of Flight
- CNGS CERN Neutrinos Gran Sasso
- CTF3 CLIC TestFacility 3

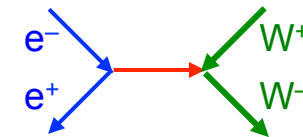
- Accélérateur électron-positron

- accélération initiale par le SPS puis injection dans l'anneau principal

- énergie initiale (1989) : 2x45 GeV → production du  $Z^0$



- puis montée à 170 GeV en 1995 → production d'une paire  $W^+ W^-$



- puis d'une paire de  $Z^0$

- finalement ↗ 209 GeV fin 2000 (→ ~~higgs à 115 GeV?~~)

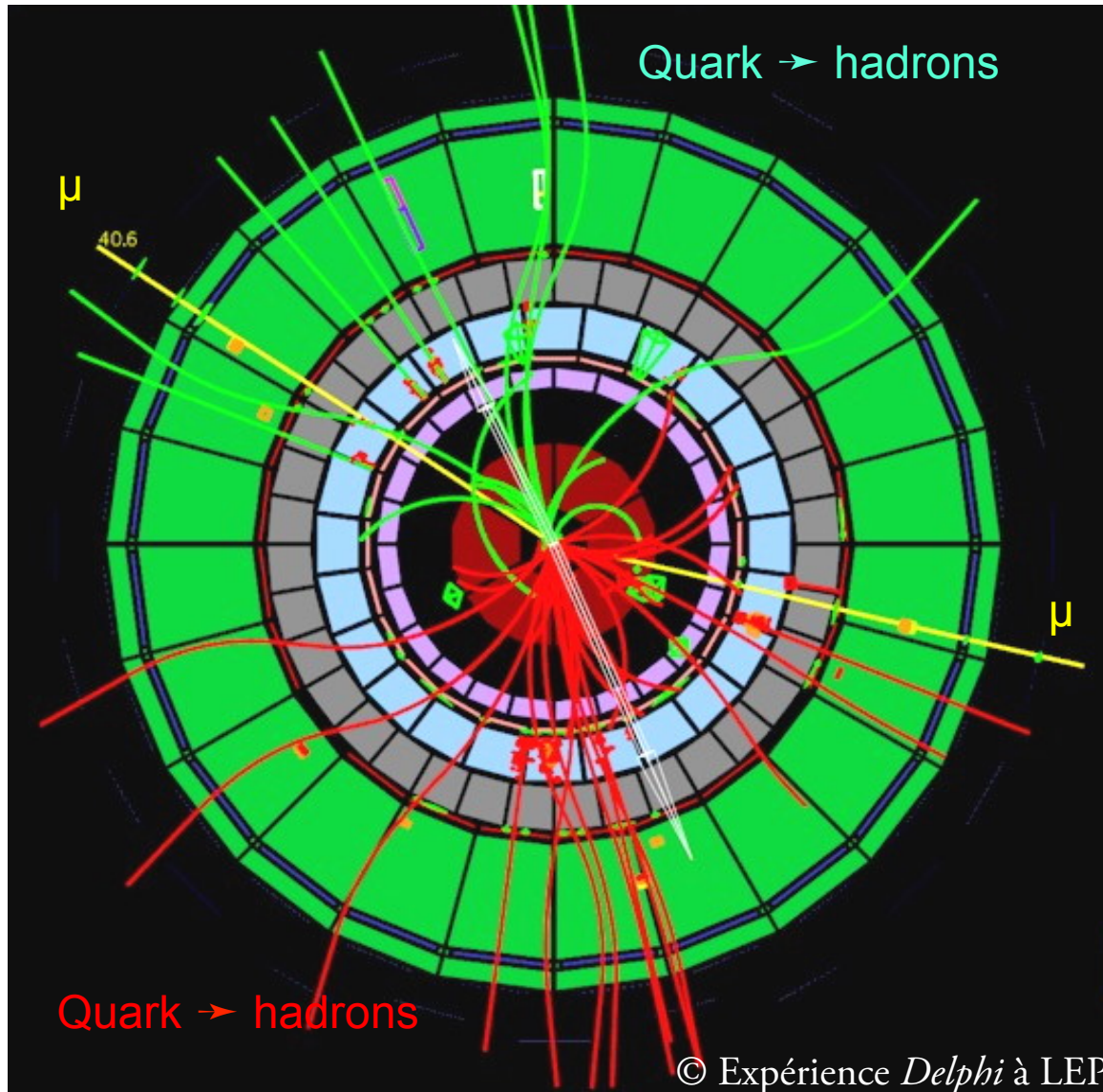
- Quatre détecteurs, et quatre expériences complémentaires

- Aleph
- Delphi
- L3
- Opal



- ➡ «modèle standard» à l'épreuve des mesures précises
- ➡ masses et largeurs des W et Z
- ➡ QCD perturbatif (précision qq %)

$e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow 2 \text{ jets de hadrons et une paire } \mu^+\mu^-$





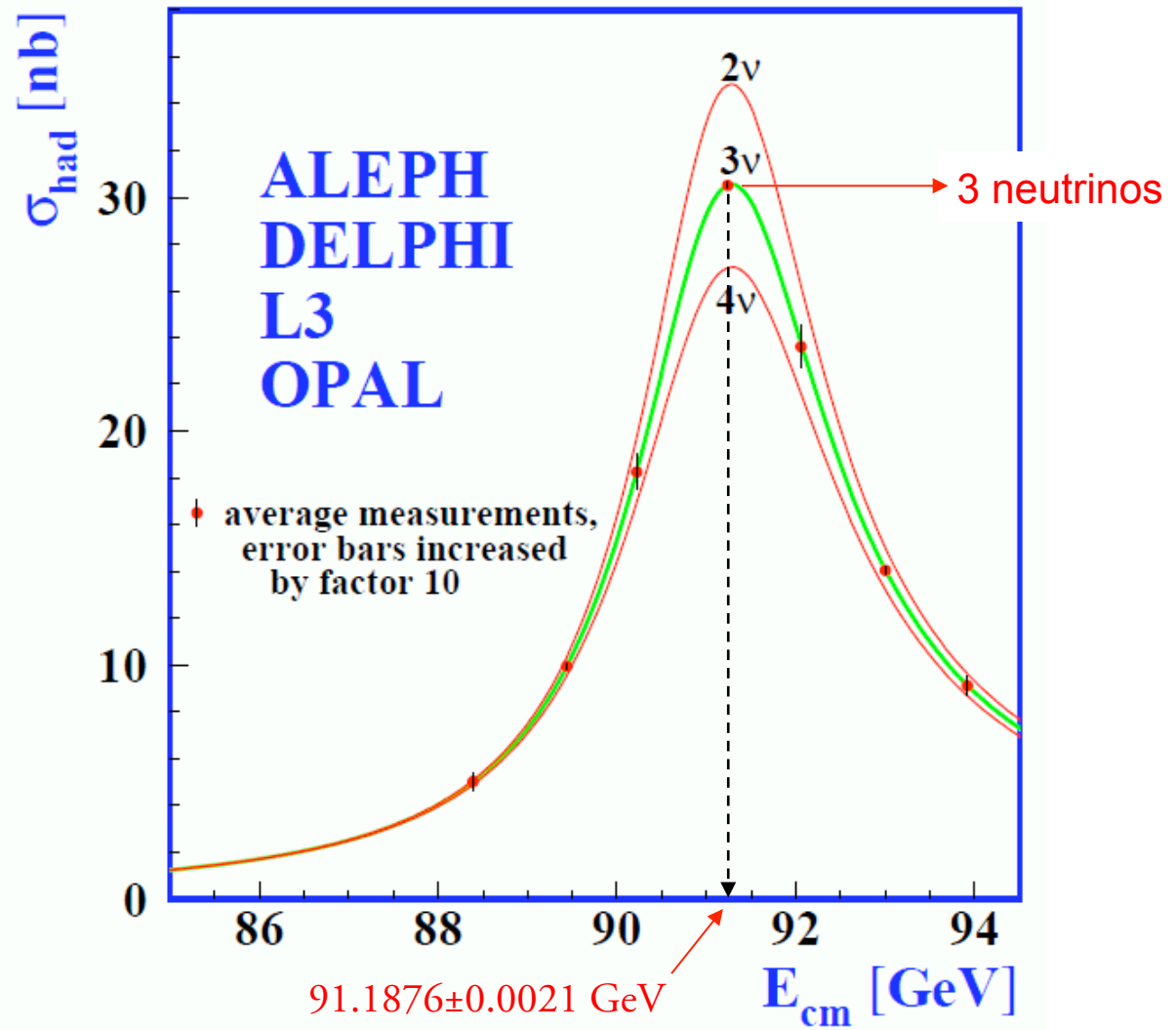
# La masse et la largeur du $Z^0$

- Largeur
- $\Leftrightarrow$  durée de vie
- $\Leftrightarrow$  nombre de canaux de désintégration
- $\Leftrightarrow$  nombre de champs couplés au  $Z^0$
- $\Leftrightarrow$  nombre de neutrinos

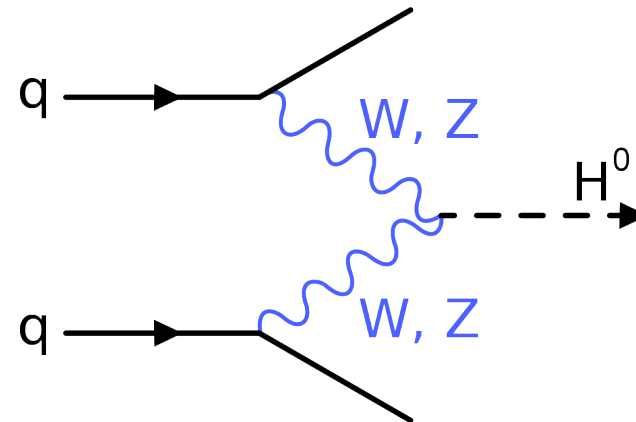
$$N_\nu = 2.994 \pm 0.012$$



- ➔ 3 familles de leptons
- ➔ 3 familles de quarks

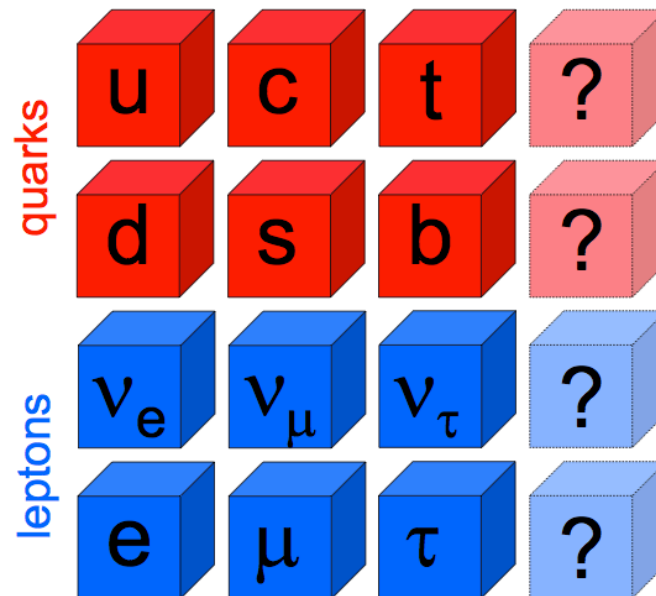


- Réflexions sur un supercollisionneur > Tevatron de Fermilab dès 1984
  - CERN : décision de réemployer le tunnel de 27 km du LEP pour un collisionneur proton-proton avec une énergie de  $2 \times 7 \text{ TeV}$  ( $2 \times 4$  en 2013) → mise en route en 2008 (coût 3 G€)
  - USA : construction d'un *Superconducting SuperCollider* [SSC ou *Desertron*] de 87 km (énergie de  $2 \times 20 \text{ TeV}$ ) arrêtée en 1993 après que 2 G\$ aient été dépensés (12 G\$ prévus)
- Objectif premier : **le boson de Higgs**
  - ou *les* bosons de Higgs
- Autres objectifs
  - plasma quark-gluon
  - recherche de la supersymétrie
  - recherche de la matière noire
- Plusieurs expériences
  - Atlas : higgs, susy... [3000 physiciens, 174 laboratoires de 38 pays]
  - CMS : higgs, susy... [2500 physiciens et 1800 ingénieurs, 179 laboratoires de 41 pays]
  - LHCb : beauté et asymétrie matière-antimatière
  - ALICE : ions lourds



# Pourquoi pas une 4<sup>o</sup> génération ?

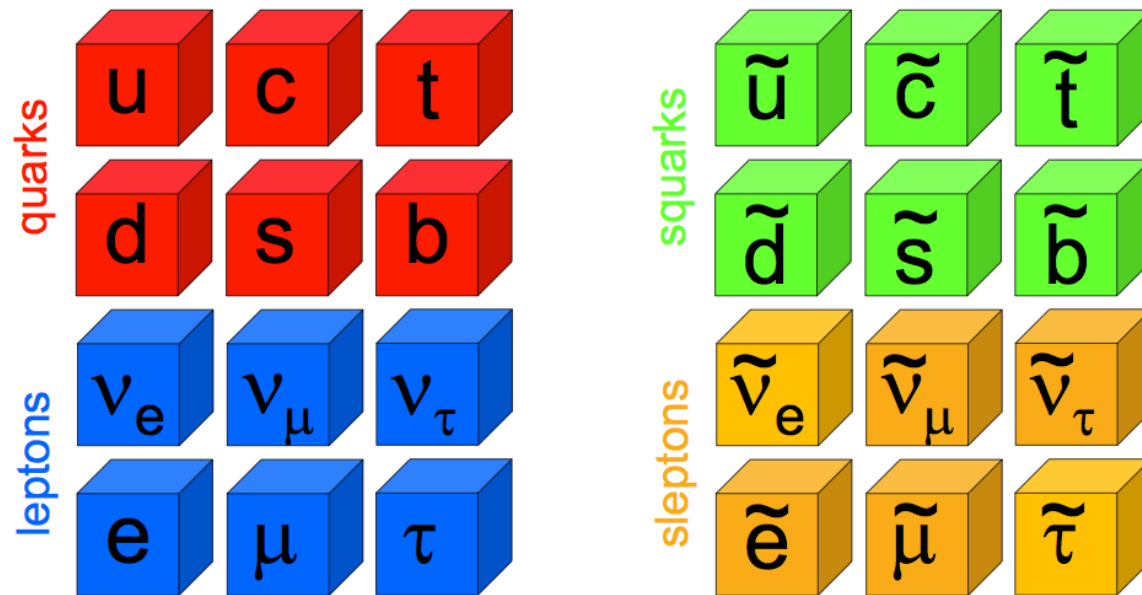
- Contraintes très fortes
  - Cosmologie : 3 particules de masse nulle (ou négligeable) lors de la nucléosynthèse
  - LEP : largeur du  $Z^0$  → nombre de neutrinos =  $2.994 \pm 0.012$



- Mais le LHC en recherche les traces éventuelles

# Et la supersymétrie ?

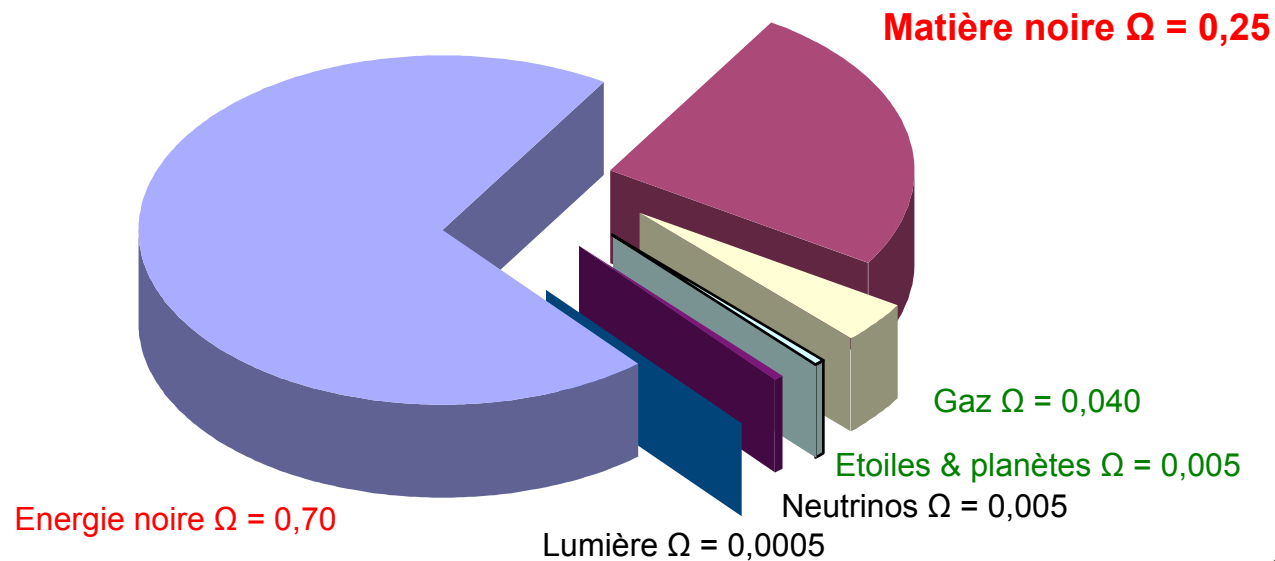
- À chaque fermion son boson
- À chaque boson son fermion



- **Aucune s-particule observée**  $\Rightarrow$  très lourdes ?  $\Rightarrow$  le LHC en cherche les traces
- La matière noire serait-elle une s-particule ?  $\Rightarrow$  **neutralino** (=photino-zino-higgsino)

# Difficulté expérimentale : la matière noire

- Observations astronomiques  $\Rightarrow$  l'essentiel de la matière de l'univers n'est pas formée de quarks et de leptons
  - *Ou alors il faut revoir les concepts de base de la physique et modifier la loi fondamentale de la dynamique  $F = m \gamma$*

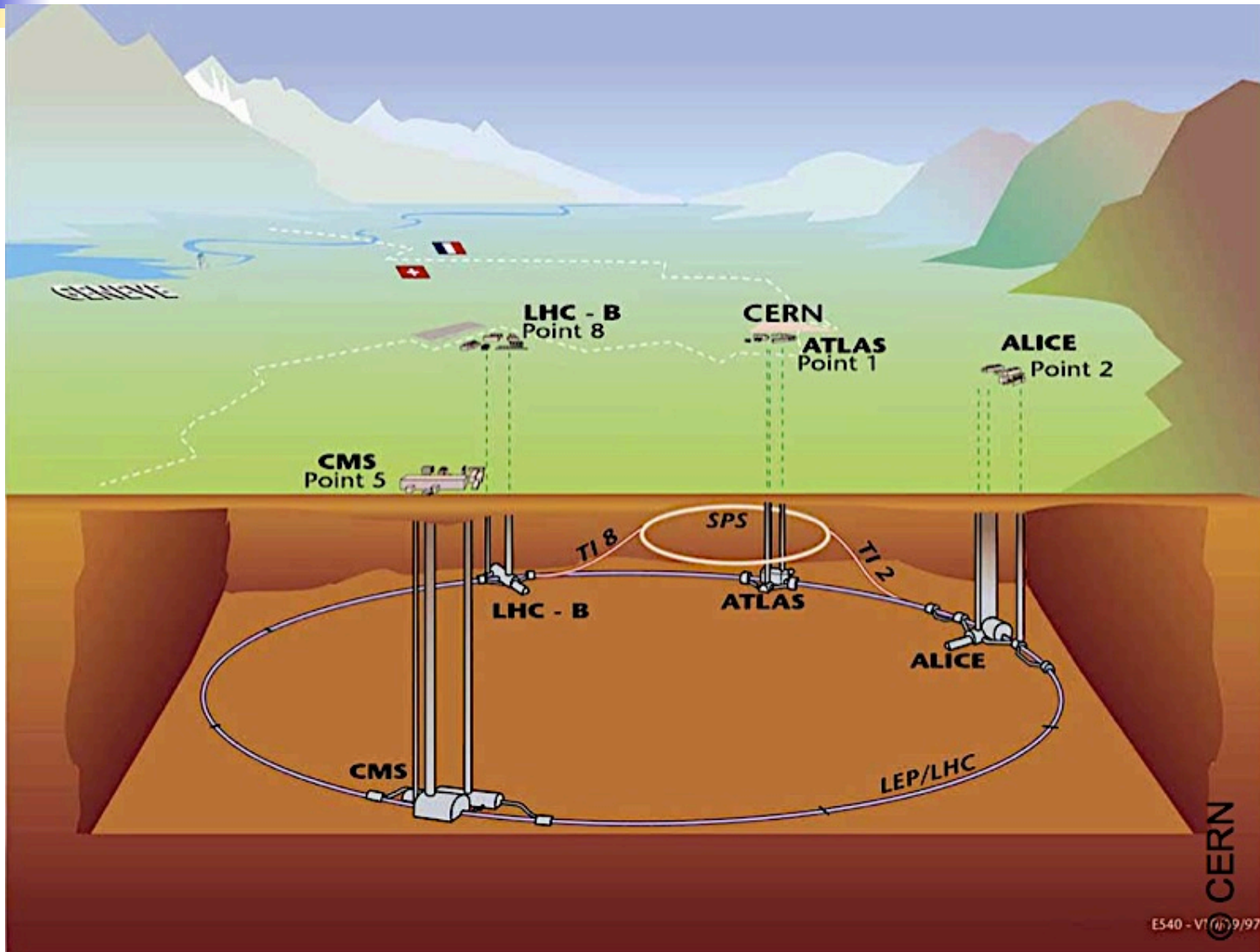


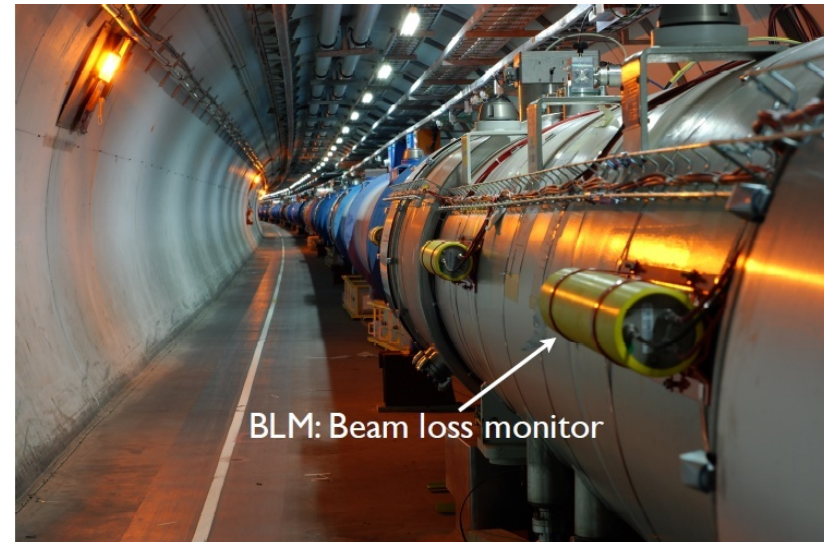
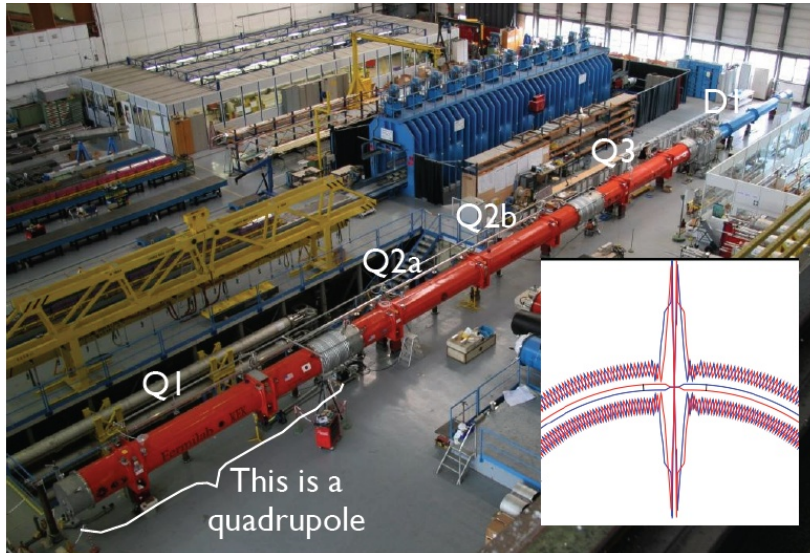
- **Mais aucune place pour cela dans le modèle standard**





# LHC

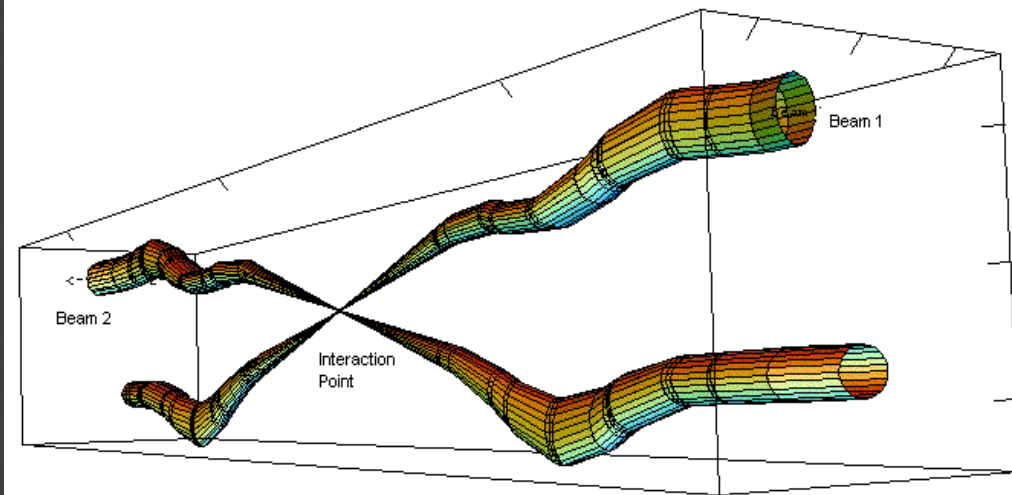






# Les faisceaux de protons du LHC

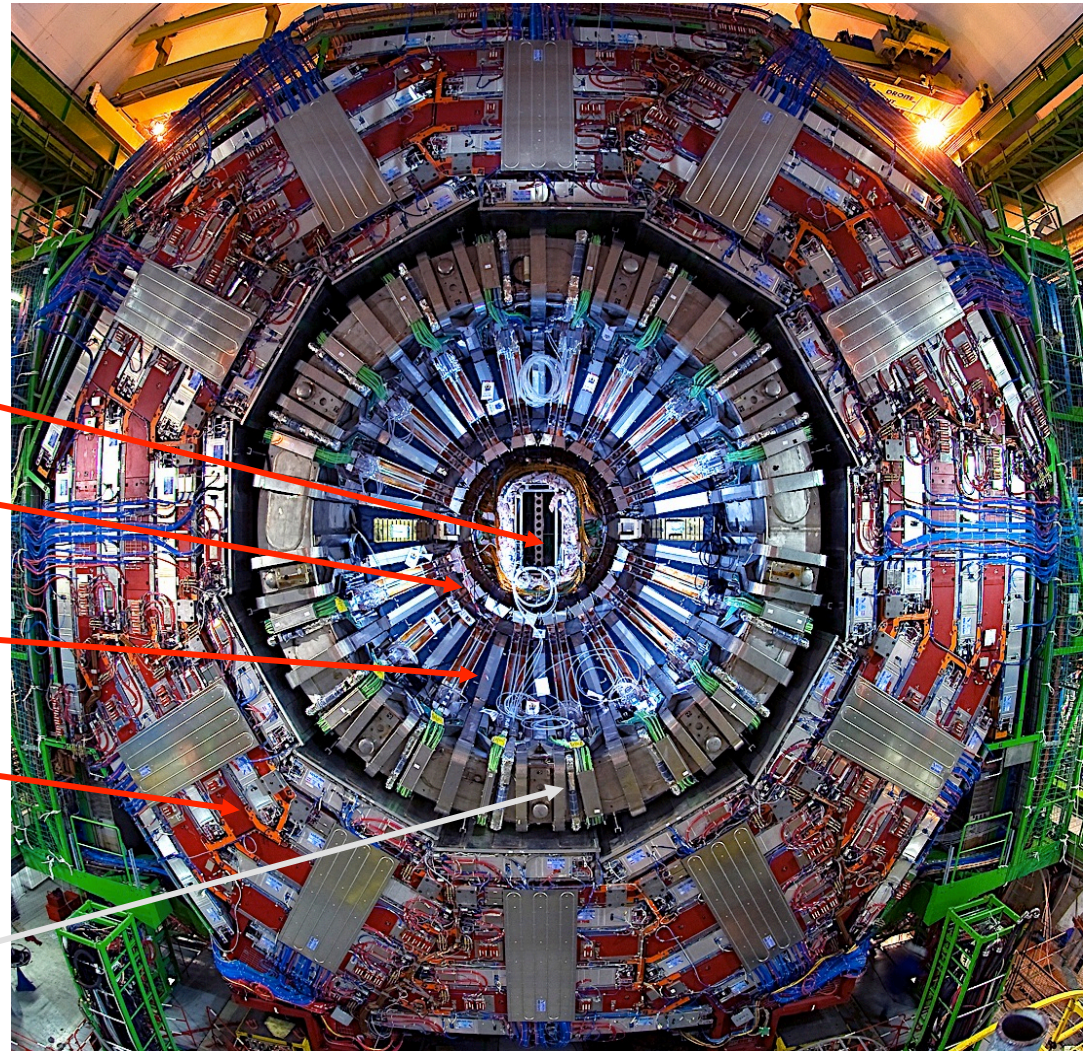
- Deux faisceaux de 3.5 TeV chacun, en sens inverse ➔ 7 GeV (en 2012)
  - 1400 paquets de  $10^{11}$  protons chacun, dans chaque sens (15 millions de croisements de paquets par seconde)
  - Un paquet : quelques cm de long, quelques mm de diamètre, réduits à quelques microns aux points d'intersection
  - ➔  $10^9$  interactions/s ➔ analyse toutes les 25 ns de  $\sim 25$  collisions *superposées* produisant chacune  $\sim 50$  traces
- ➔ 7.5 m à la vitesse de la lumière



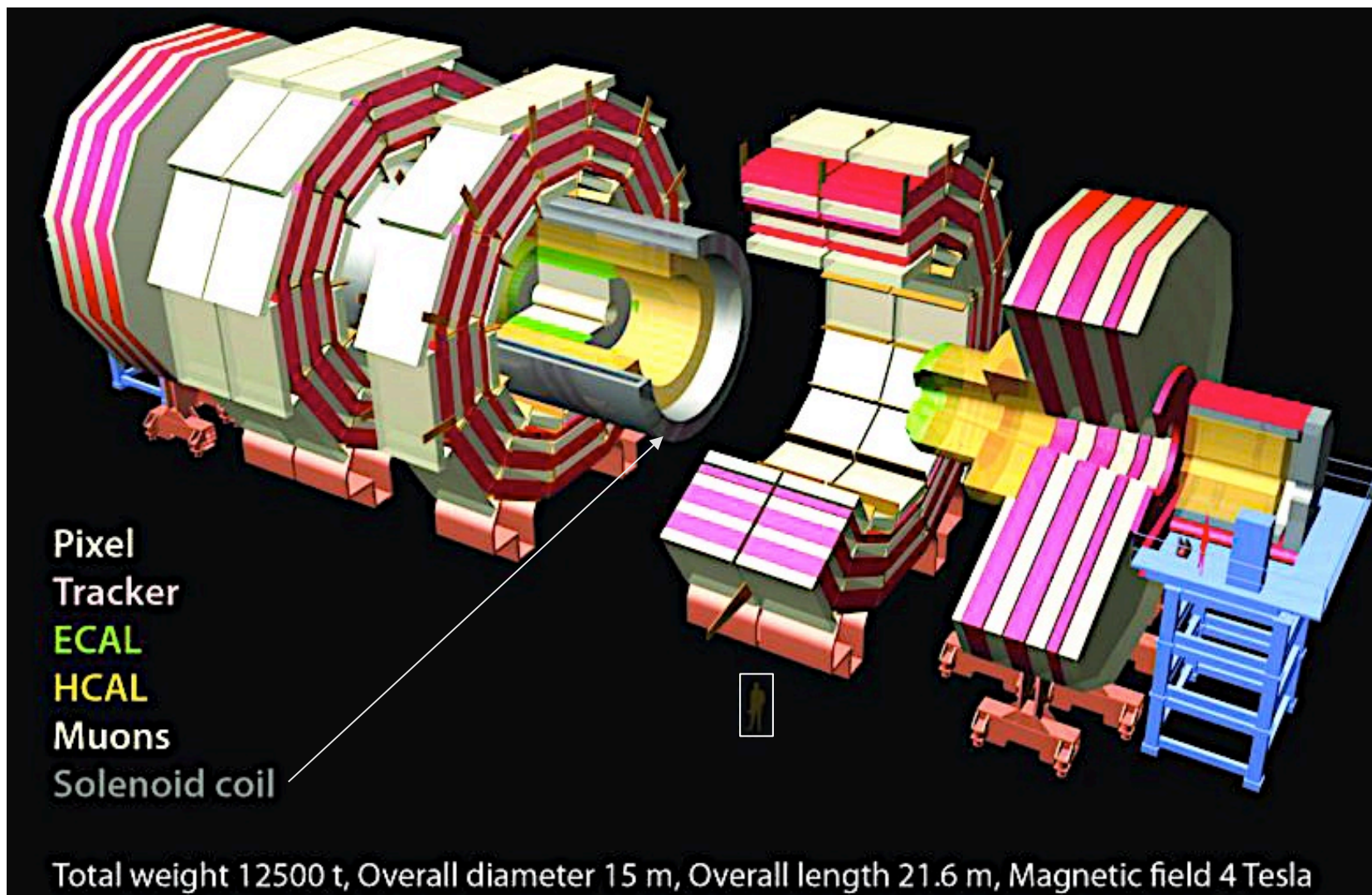
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

# Un détecteur contemporain : CMS au LHC

- Diamètre : 15 m
- Longueur : 21.6 m
- Poids : 12 500 tonnes
- Du centre à la périphérie
  - détecteur de vertex
  - **trajectographe** en silicium  
(suit les particules **chargées**)
  - **calorimètre** électromagnétique  
(*absorbe* électrons et photons)
  - **calorimètre** hadronique  
(*absorbe* les jets de hadrons)
  - chambres à **muons**  
(visibles dans le trajectographe  
pas dans les calorimètres)
  - le tout dans un **champ**  
**magnétique** solénoïdal de 4 T

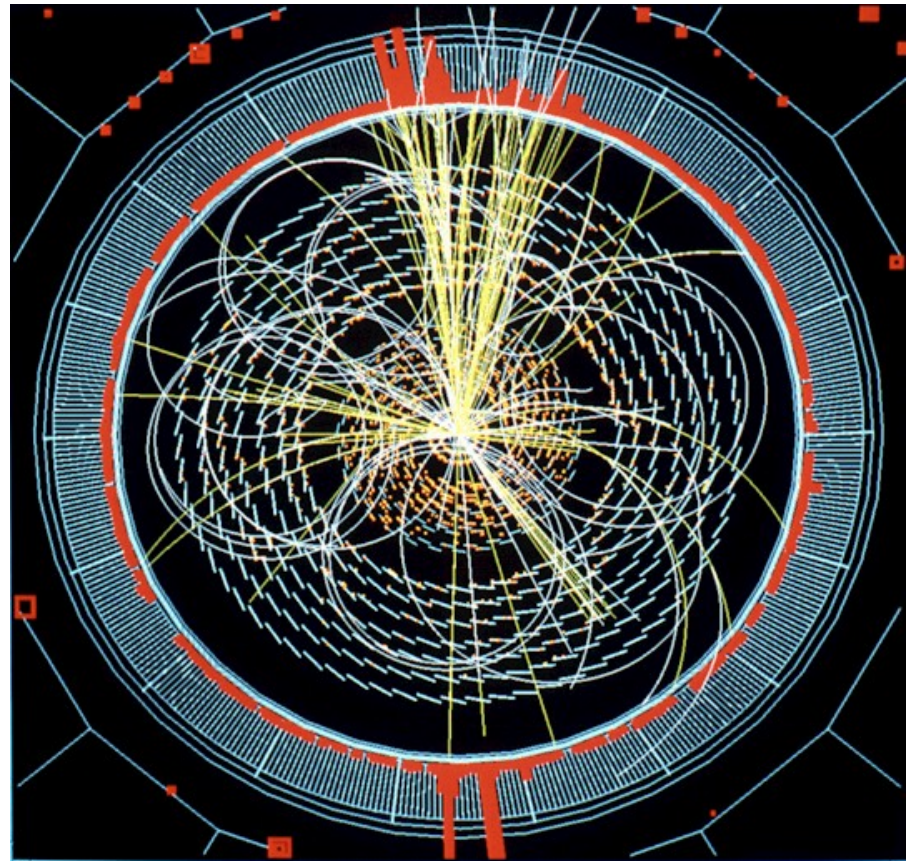
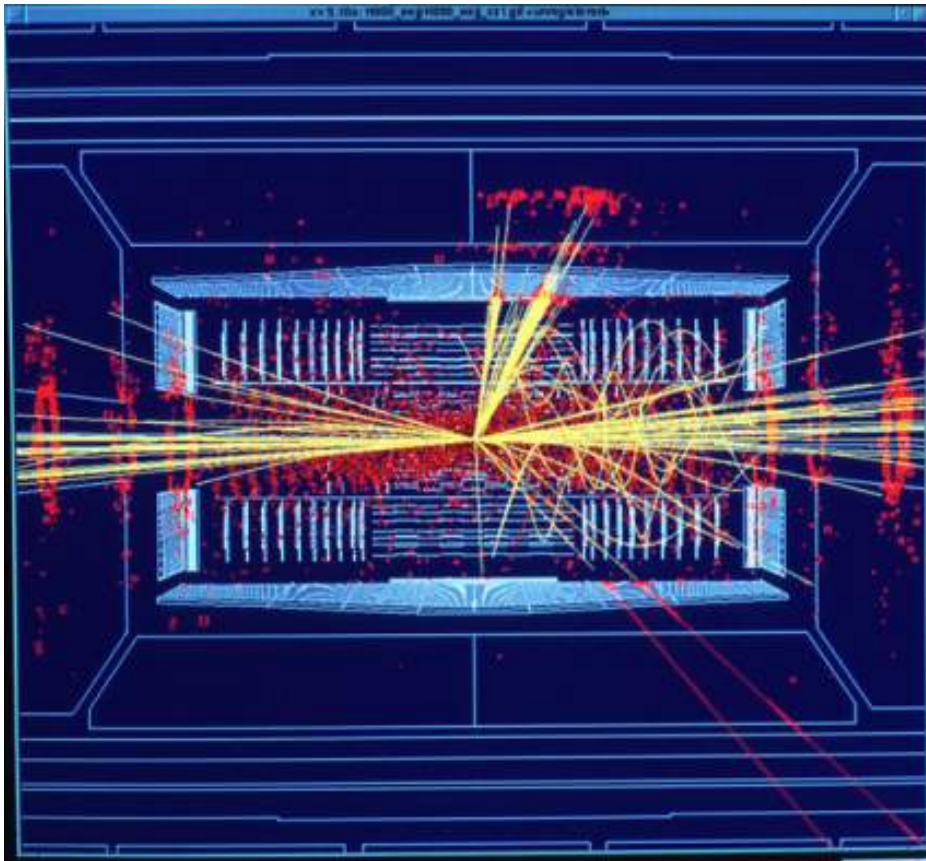


# Un détecteur contemporain : CMS au LHC

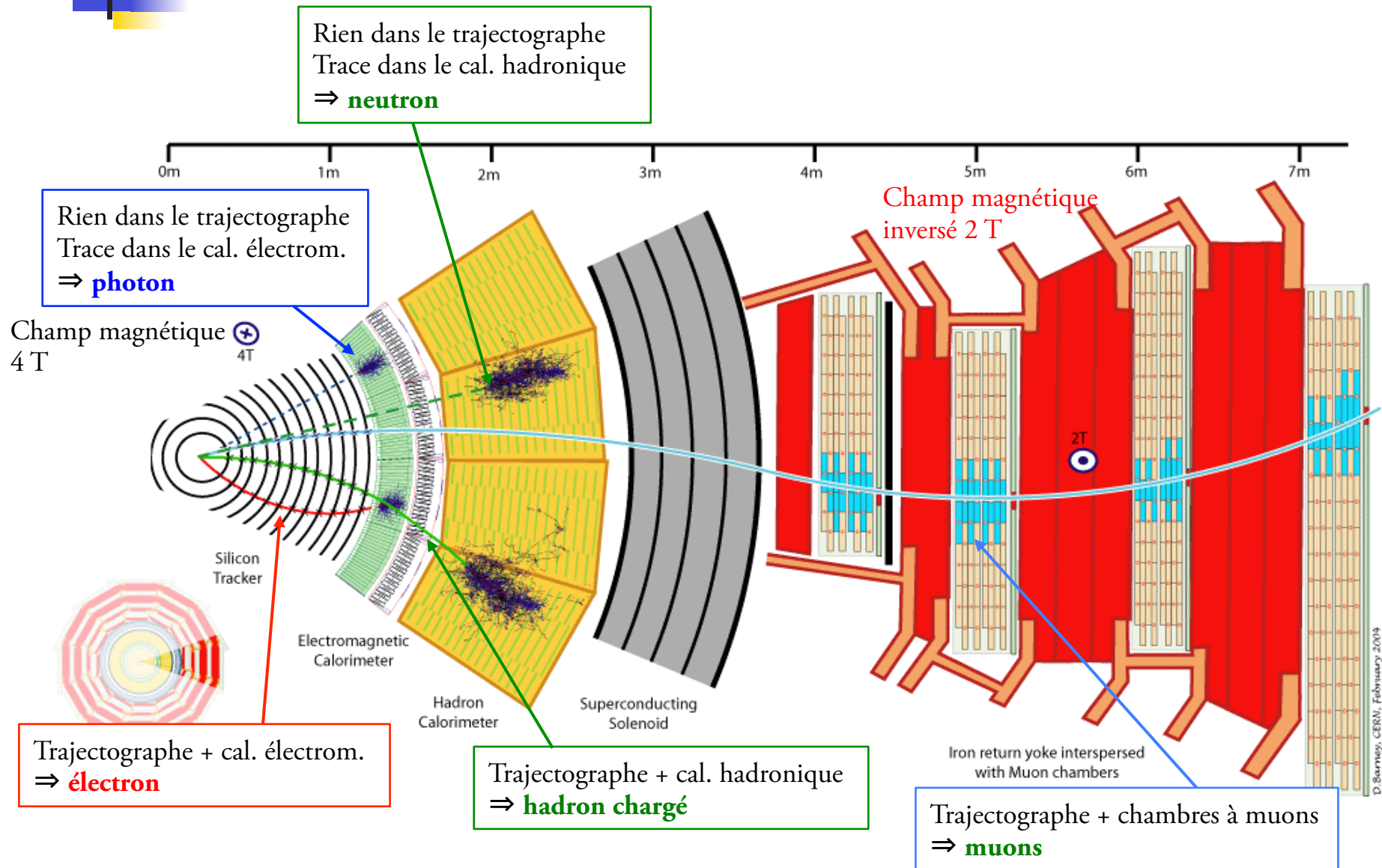


# Simulation de Higgs dans CMS au LHC

- $H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow e^+ + e^- + 2 \text{ jets de hadrons}$

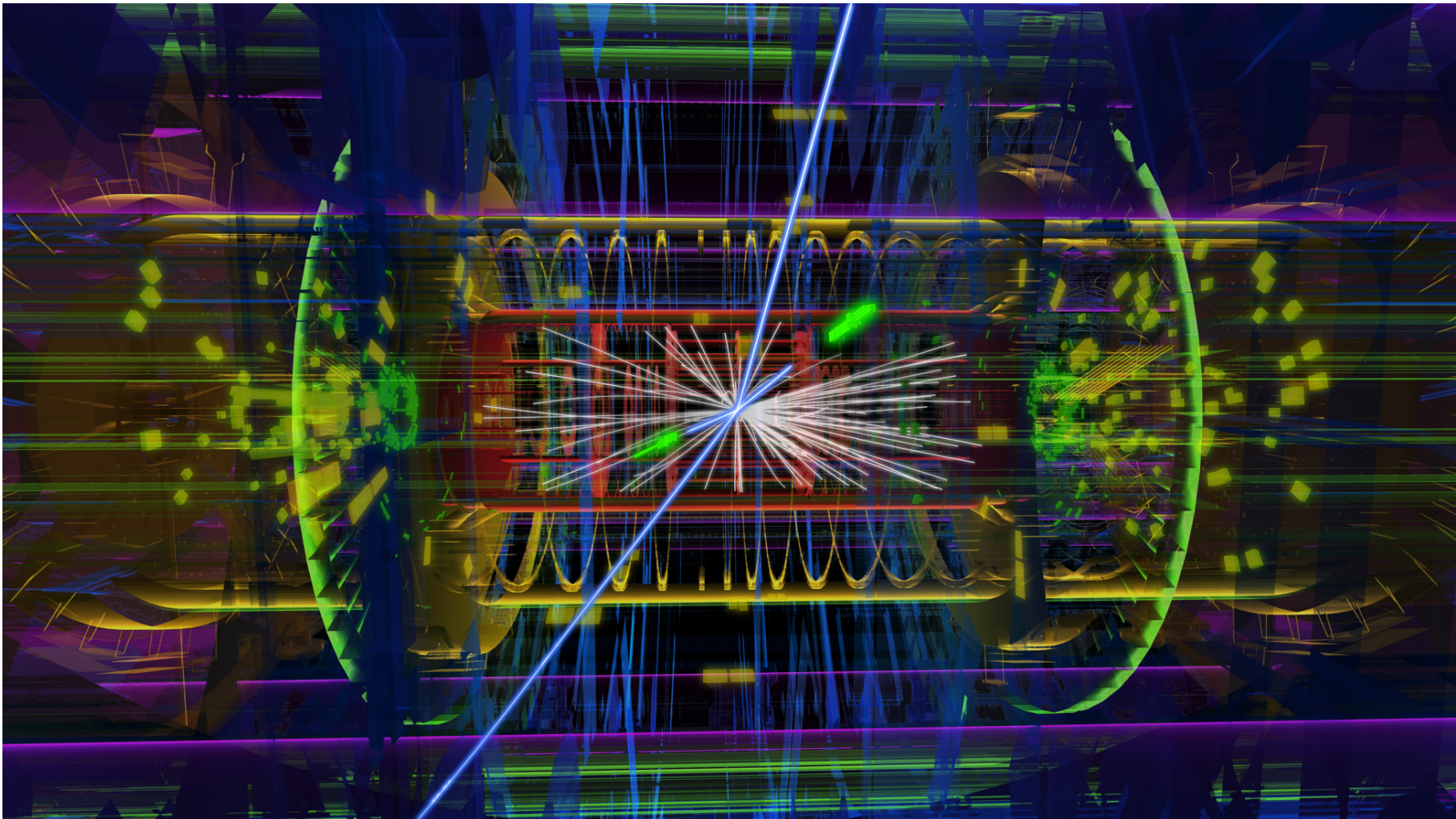


# Comment ça marche ?

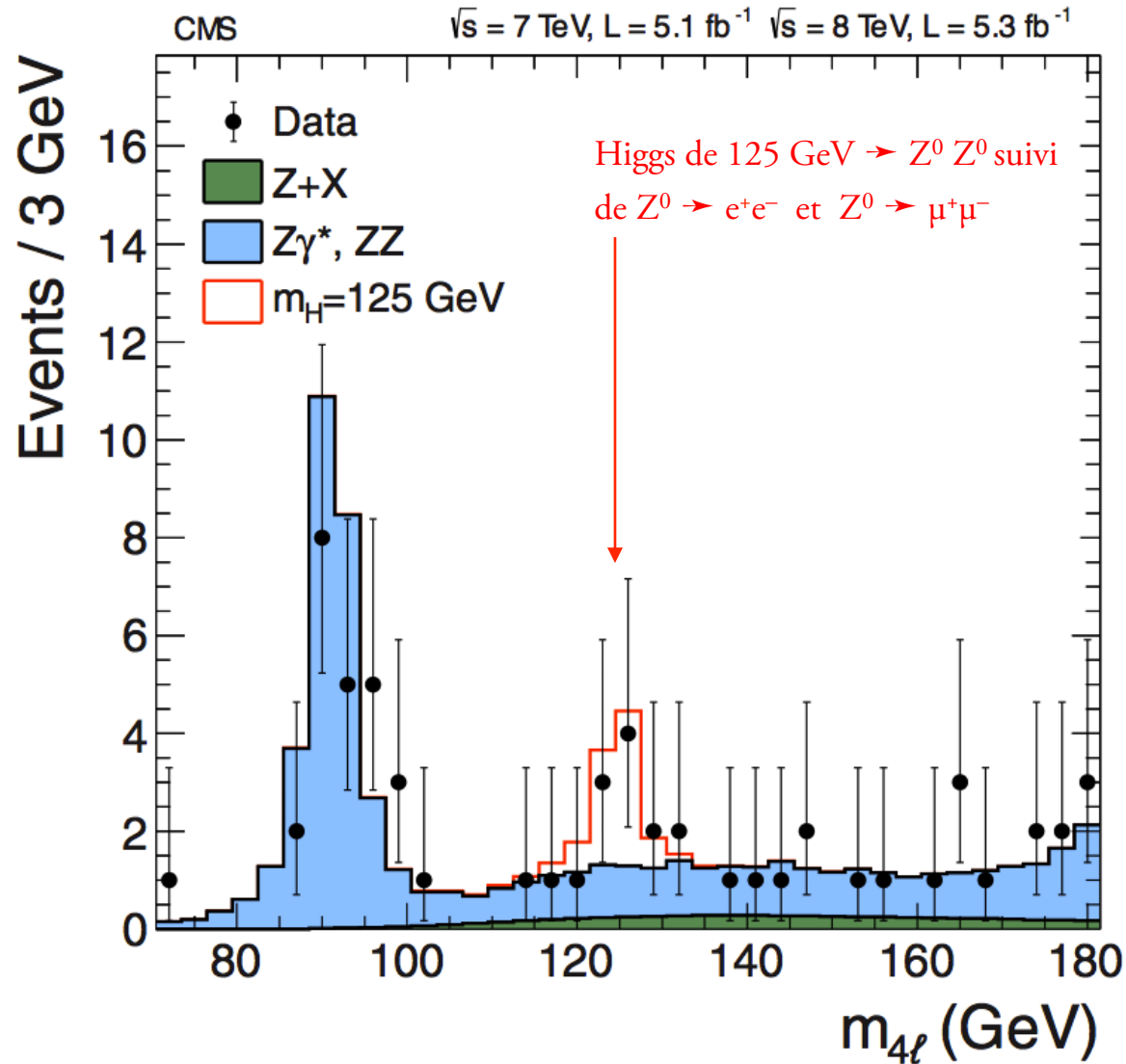


# Le boson de Higgs ?

- LHC-ATLAS : événement 2 électrons + 2 muons **pouvant** résulter d'une désintégration de higgs

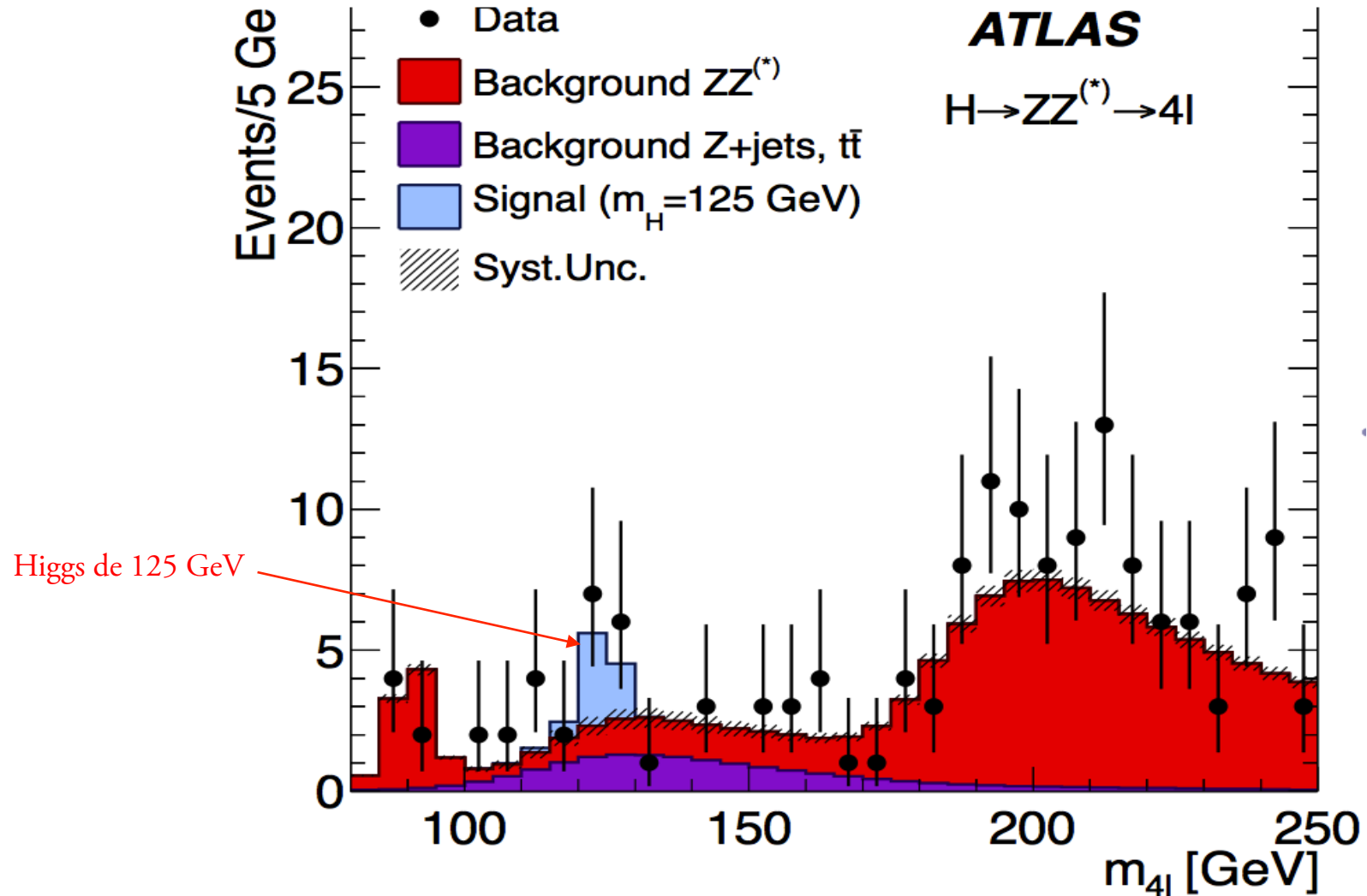


# Masse invariante de 4 leptons [CMS]



# Masse invariante de 4 leptons [ATLAS]

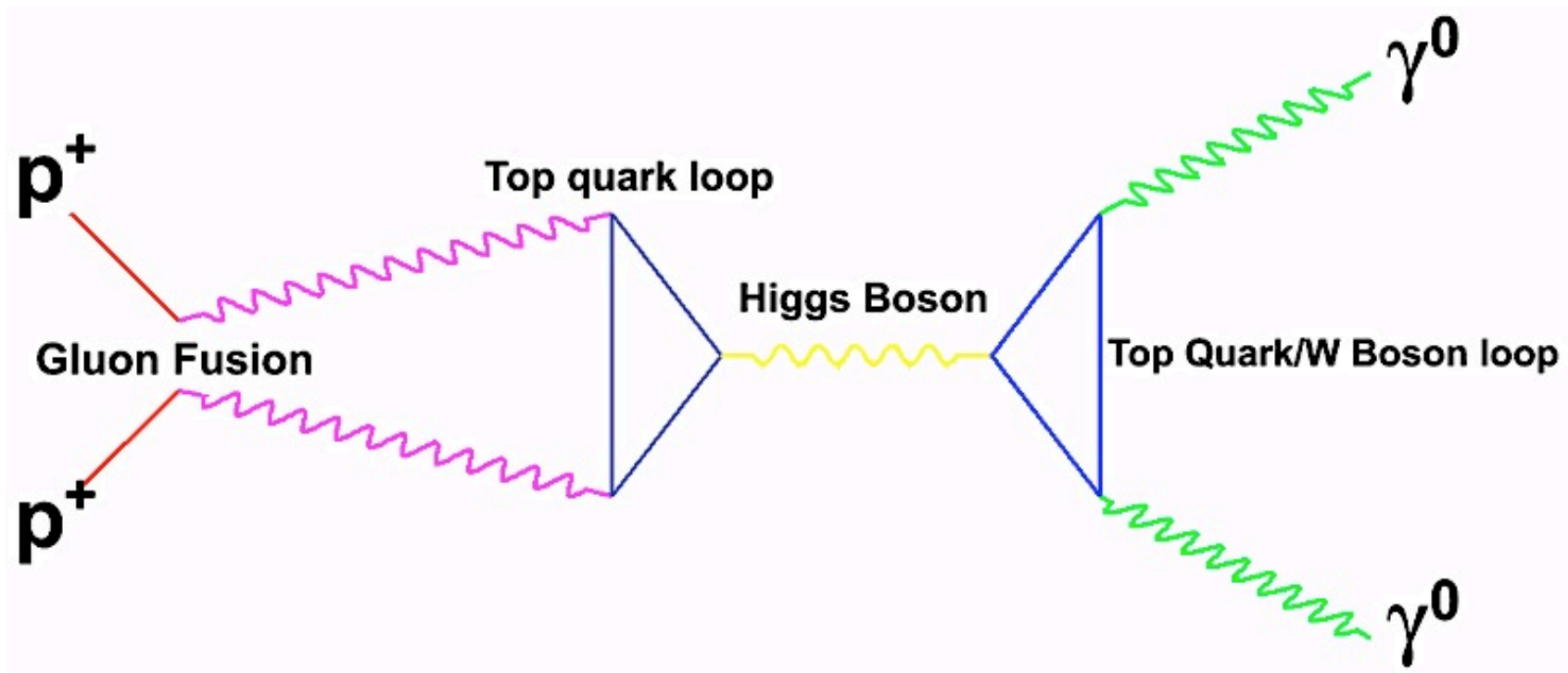
$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}: \int \mathcal{L} dt = 4.8 \text{ fb}^{-1}$   $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}: \int \mathcal{L} dt = 5.8 \text{ fb}^{-1}$



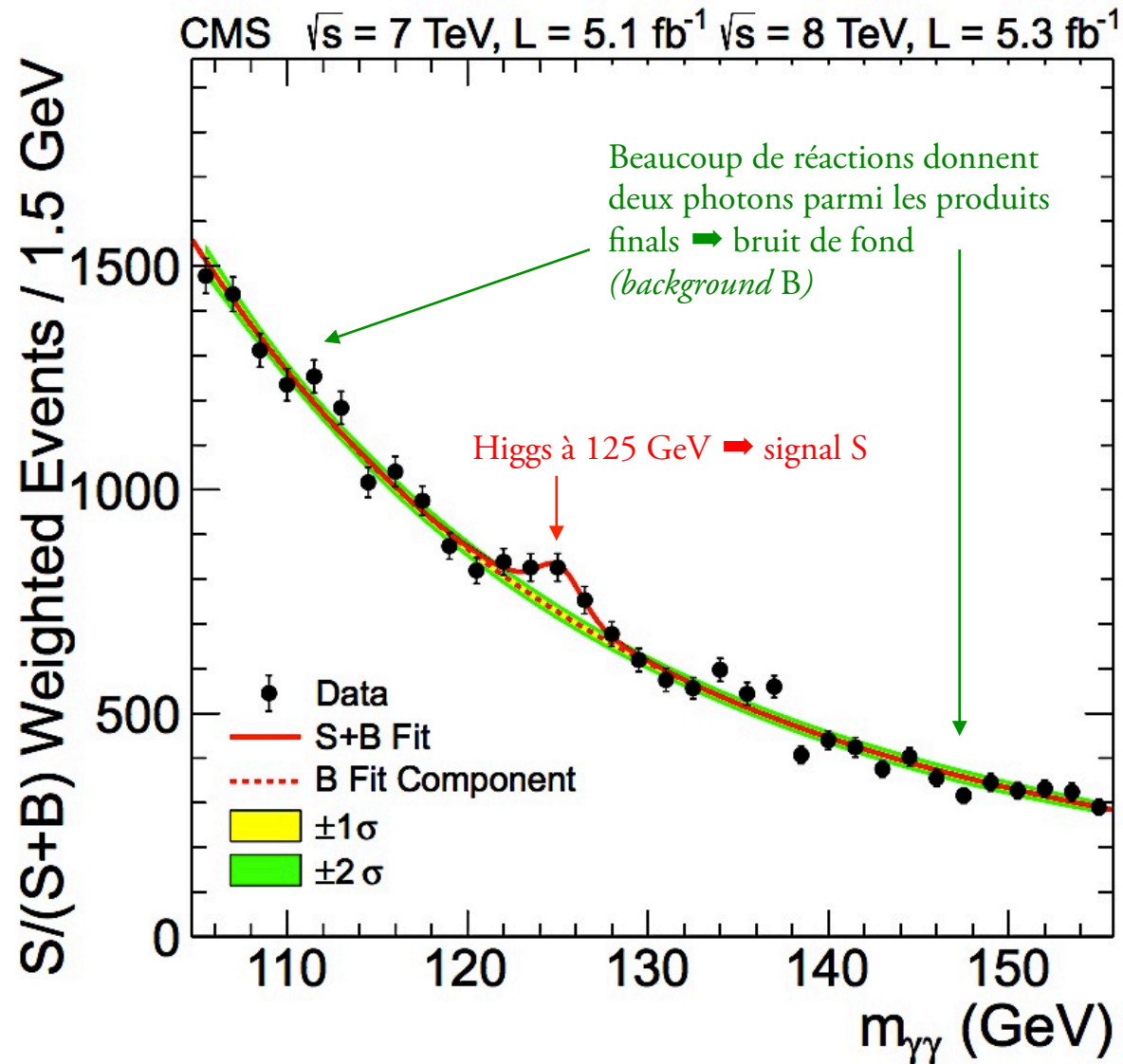


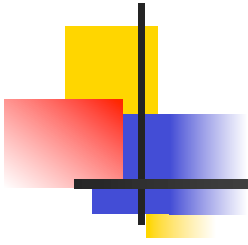
## Une autre possibilité : $H^0 \rightarrow 2 \gamma$

- Le boson de Higgs est couplé à une particule *proportionnellement à la masse de celle-ci*  $\Rightarrow$  couplage de préférence au quark top, ou aux W et Z
- Masse invariante des 2  $\gamma \Rightarrow$  masse du higgs



# Masse invariante de 2 photons





Merci de votre attention !

