



CHAMPS & PARTICULES

CONFIRMATIONS DU MODÈLE STANDARD

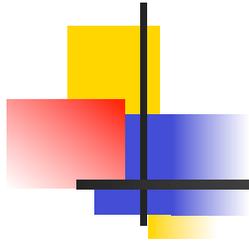


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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

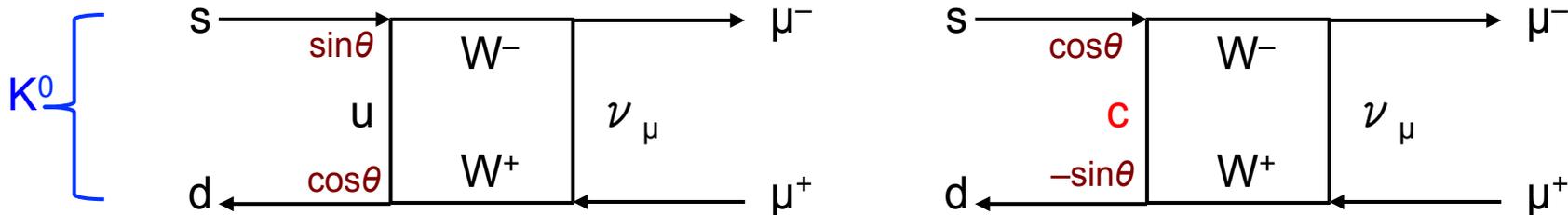




LA RÉVOLUTION ~~D'OCTOBRE~~ DE NOVEMBRE

Un quatrième quark ?

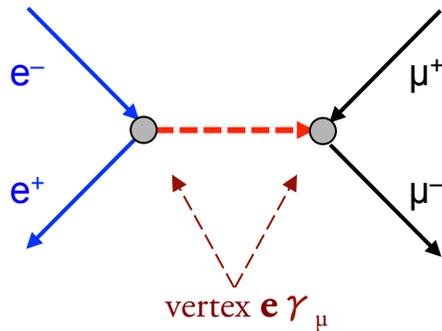
- Expérimentalement $K^0 \Rightarrow \mu^+\mu^-$ alors que c'est théoriquement possible via



- 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)

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

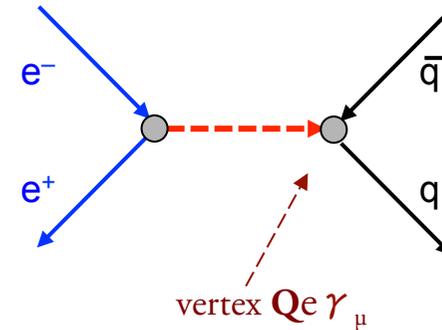
- Réaction $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ au 1^o ordre



- \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^o ordre



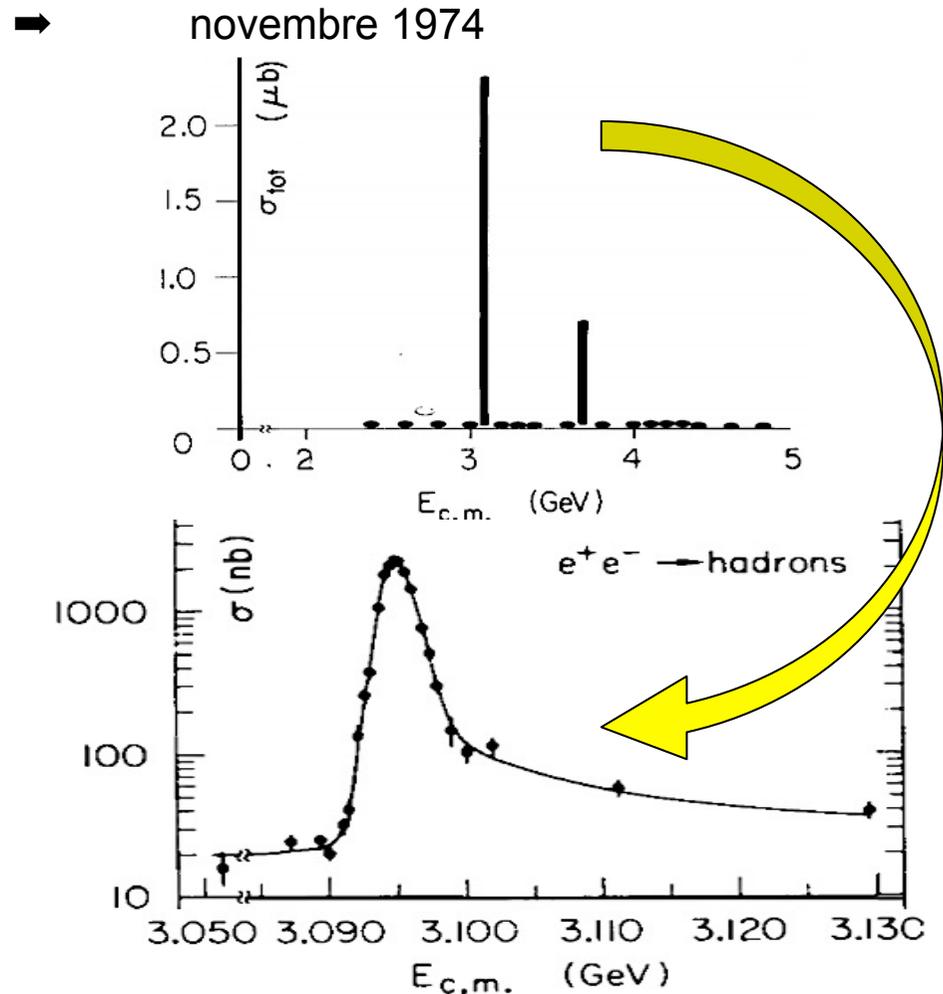
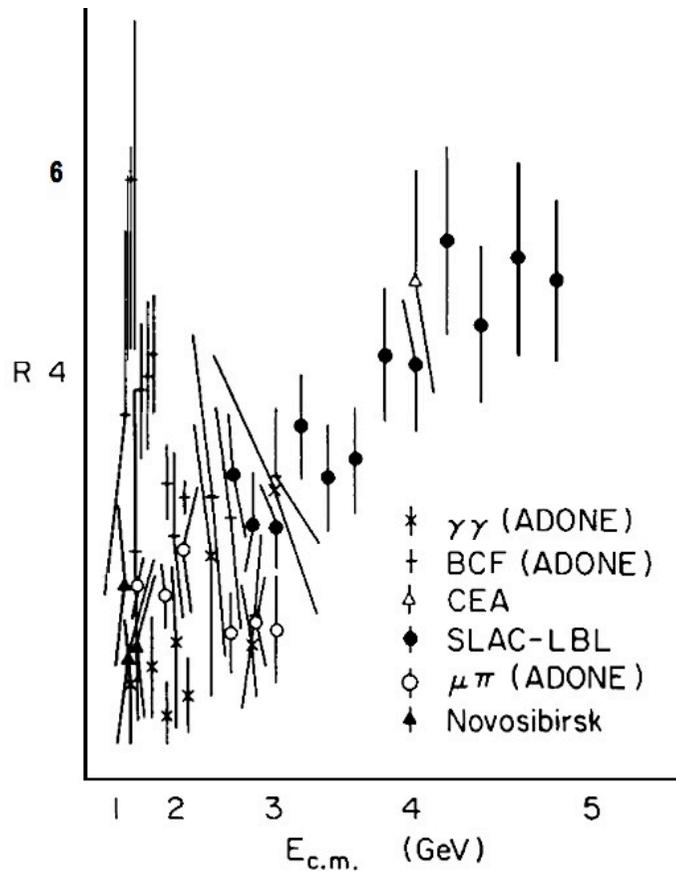
- \Rightarrow amplitude $Qe^2 M$
[$Q = 2/3$ pour le quark u, $Q = -1/3$ pour d et s]
- \Rightarrow sections efficaces

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

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

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

- 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/ψ

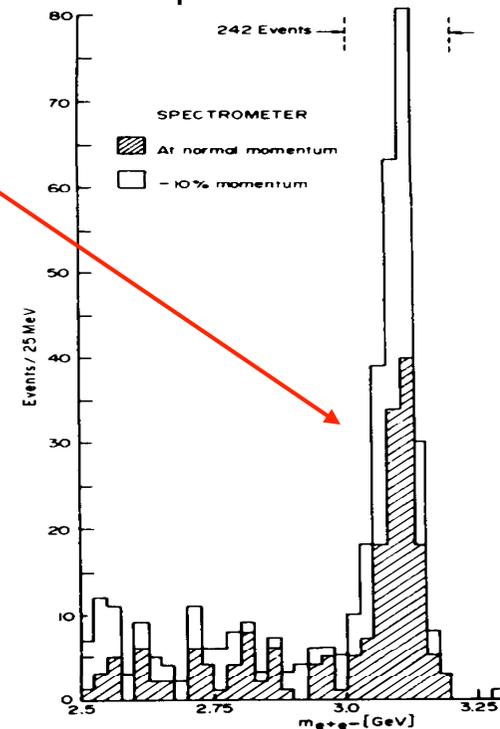
- Burton Richter (à SLAC)
 - bizarreries des sections efficaces e^+e^- autour de 2×1.5 GeV à Frascati (AdA puis Adone)
 - collisionneur e^+e^- SPEAR au SLAC (1972) : $3+3$ GeV
 - mesure minutieuse de la section efficace par très petits pas en énergie
 - → résonances **très étroites** : ψ à 3.097 puis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

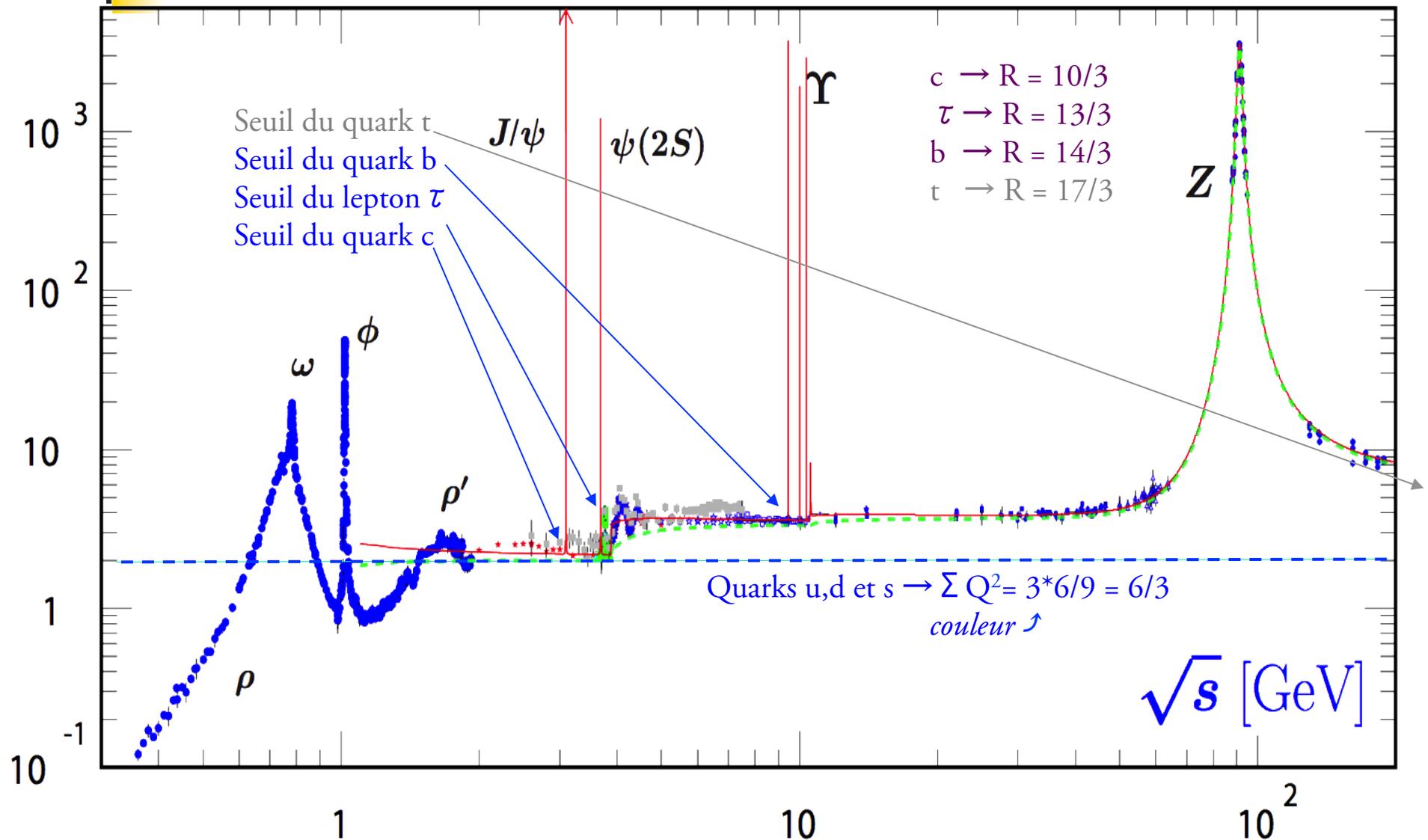
■ Interprétation : méson $c\bar{c}$

■ Puis ensuite

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



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

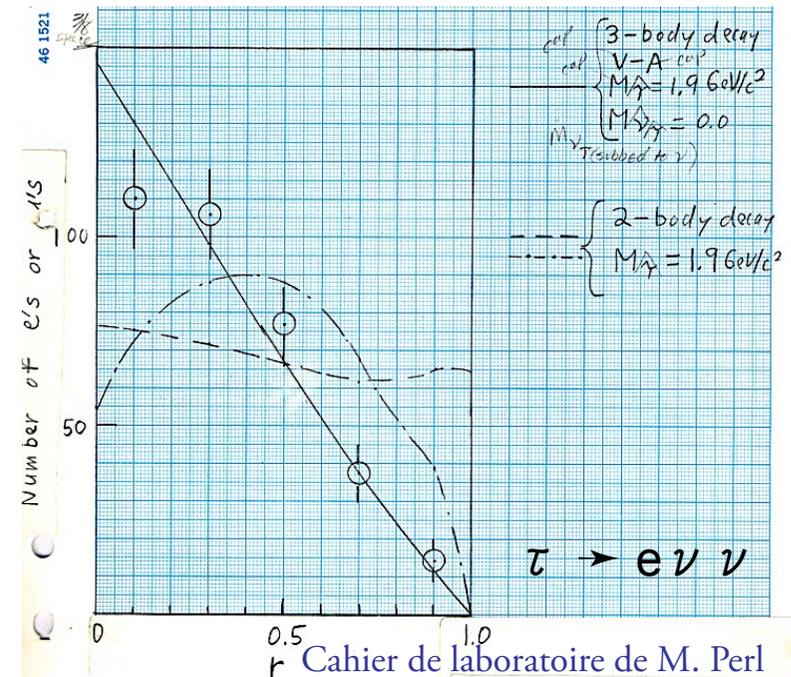


Après le muon, encore un lepton non prévu !

- 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 »

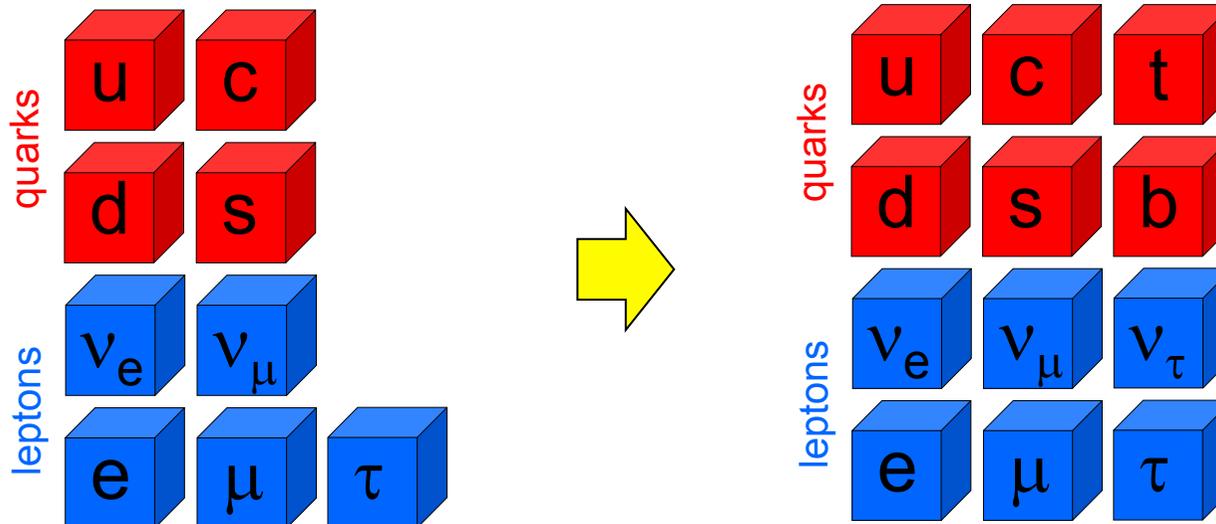
- ➔ suggestion : $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + 4\nu$

- où le τ est un (troisième) lepton, de masse 1776.82 ± 0.16 MeV
 - le symbole τ [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 !

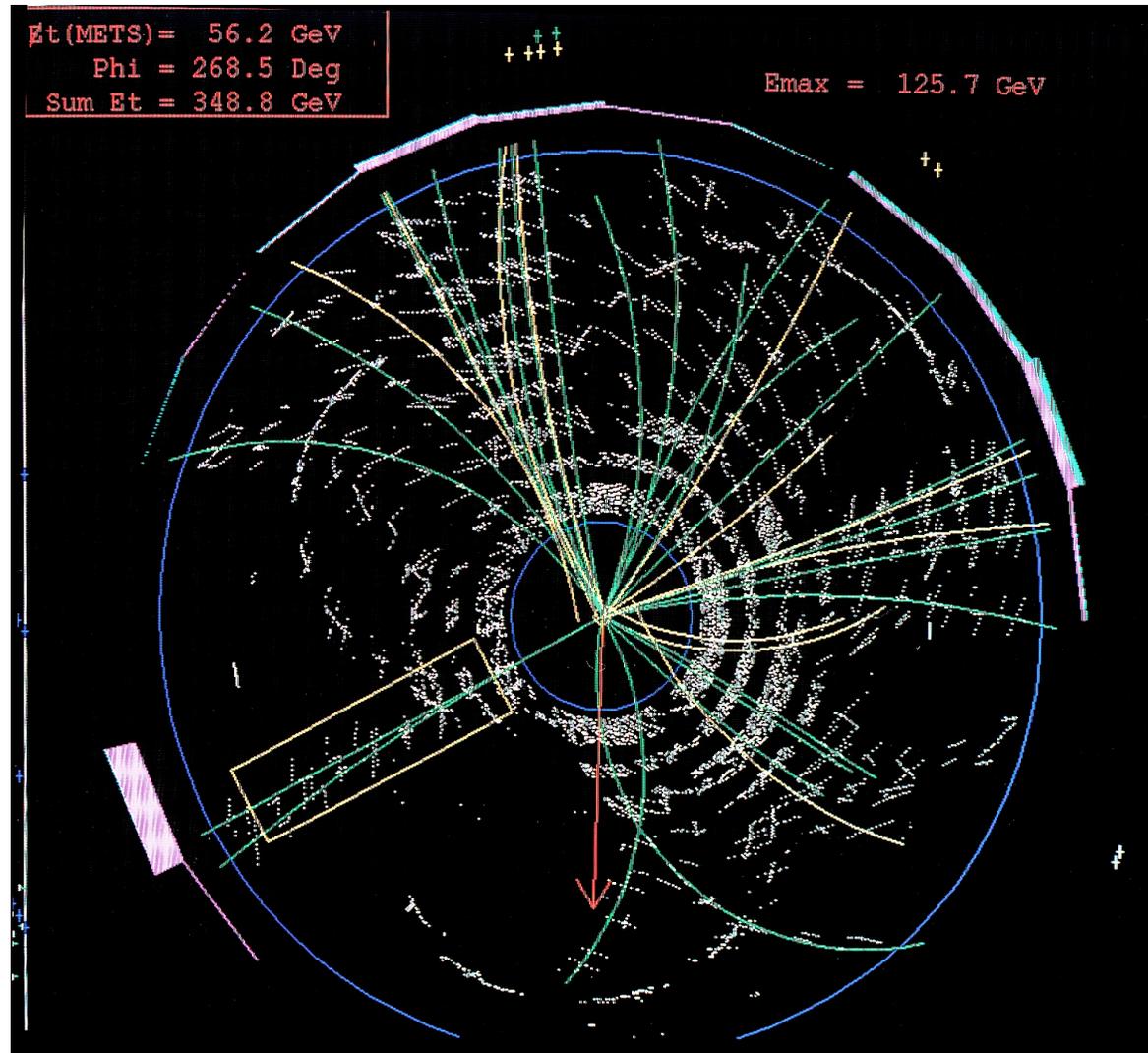
- Mais un lepton τ analogue au muon et à l'électron \rightarrow neutrino ν_τ associé ?
- Et probablement un **nouveau doublet de quarks** pour compléter la famille (et corriger l'anomalie d'Adler-Bell-Jackiw)
- 1977 : découverte du Υ (upsilon)
 - méson $b\bar{b}$ de masse 9.46 GeV
 - puis autres mésons $b\bar{b}$
 - 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 ν_e
 - μ et ν_μ
 - τ et ν_τ

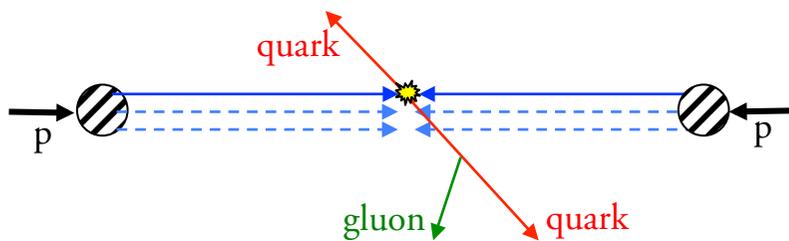


Jets

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

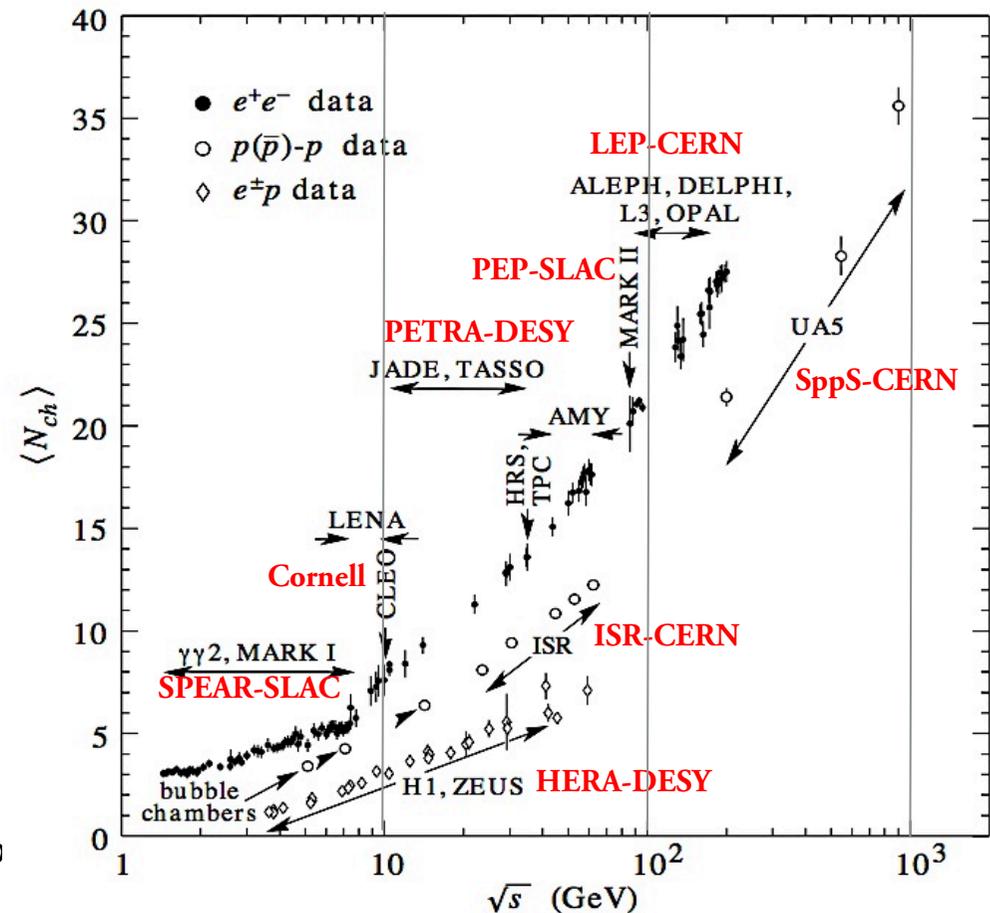
- Modèle des quarks

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

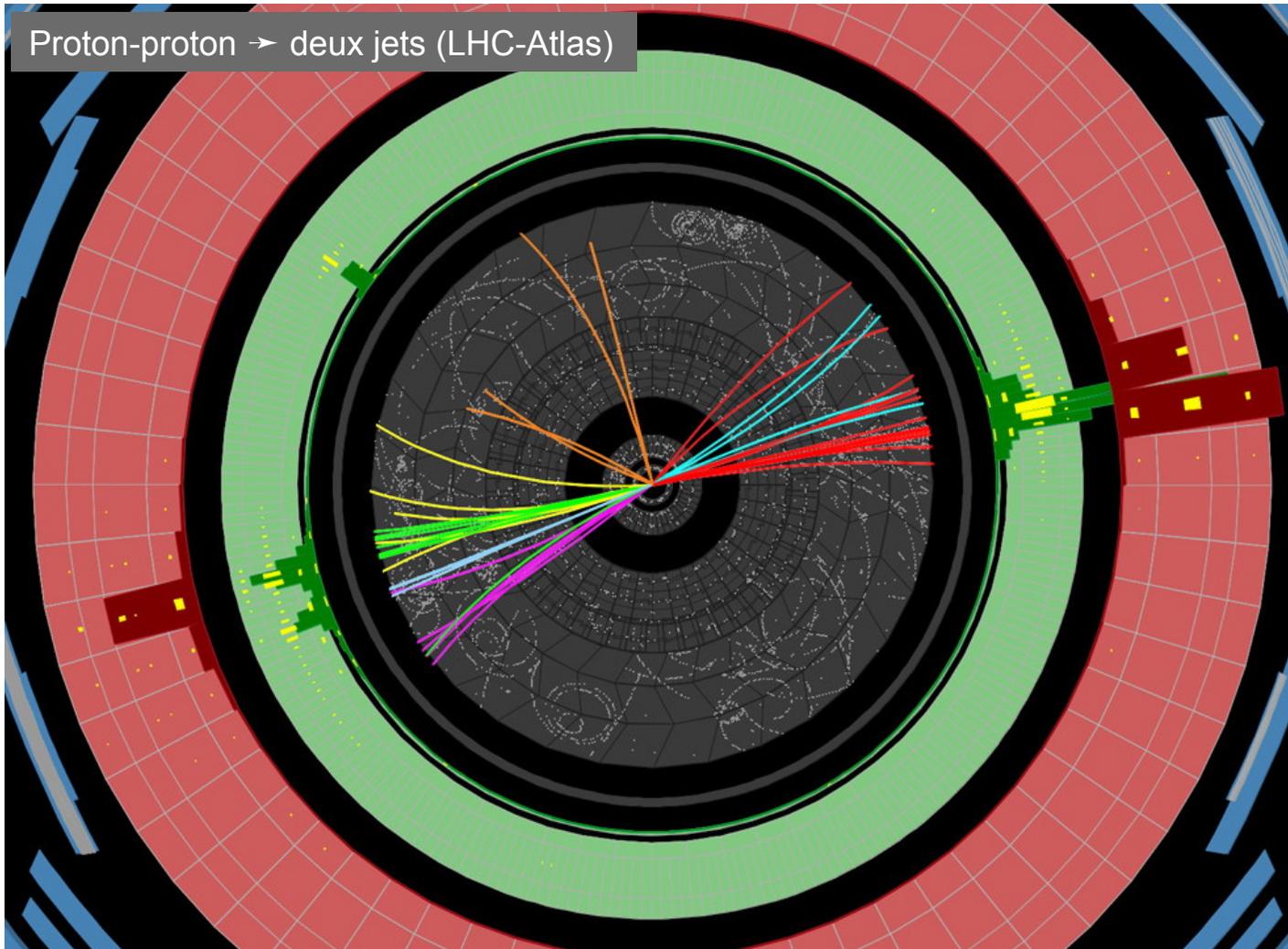


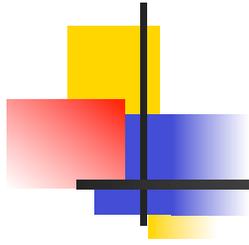
- QCD

- 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



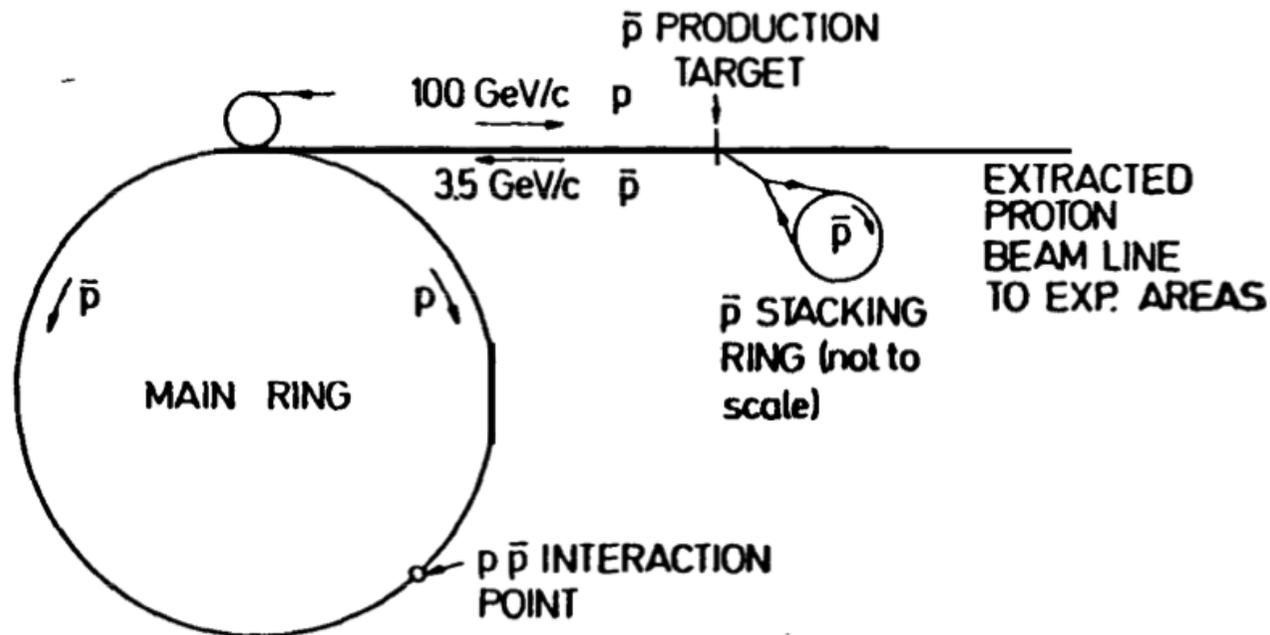
Simon van der Meer



Carlo Rubbia

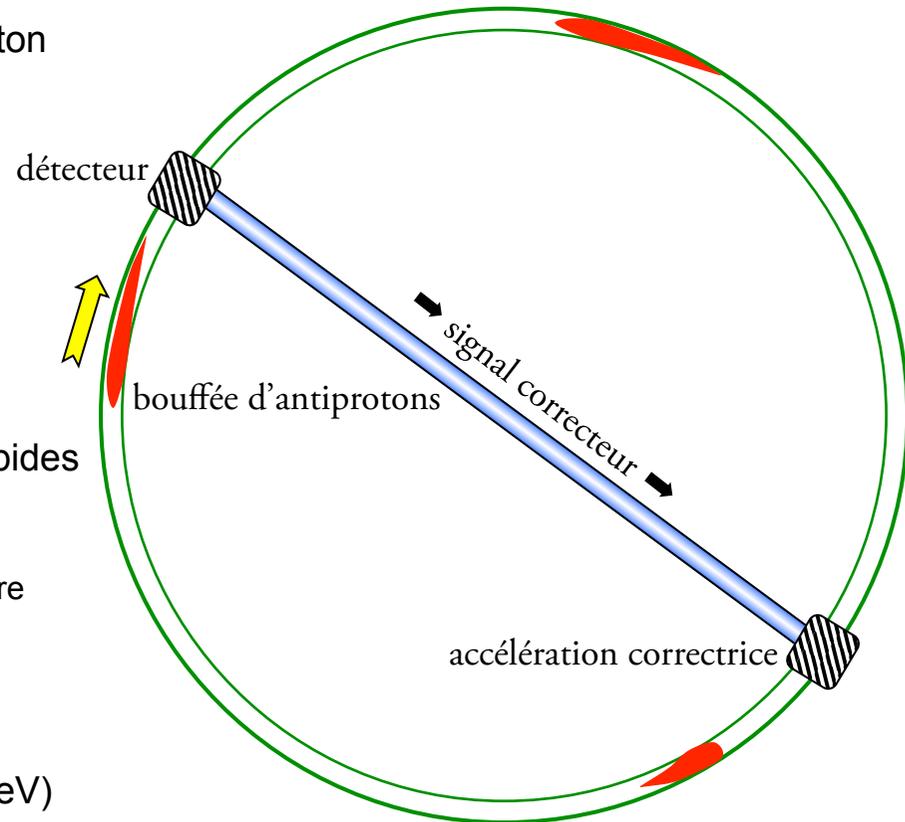
Collisions proton-antiproton

- 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



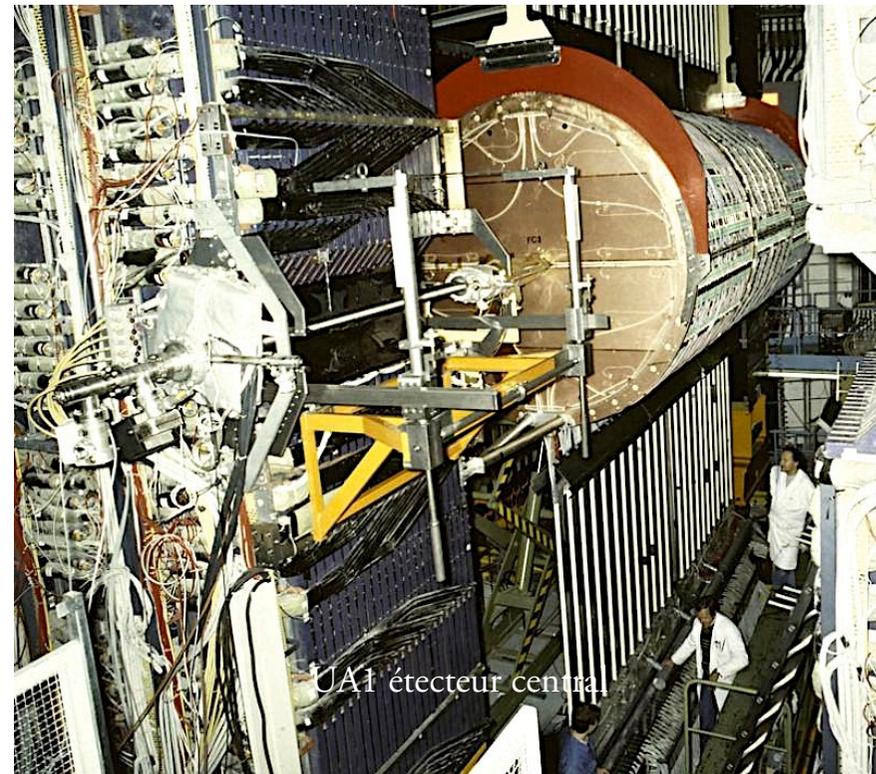
Refroidissement stochastique des antiprotons

- 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

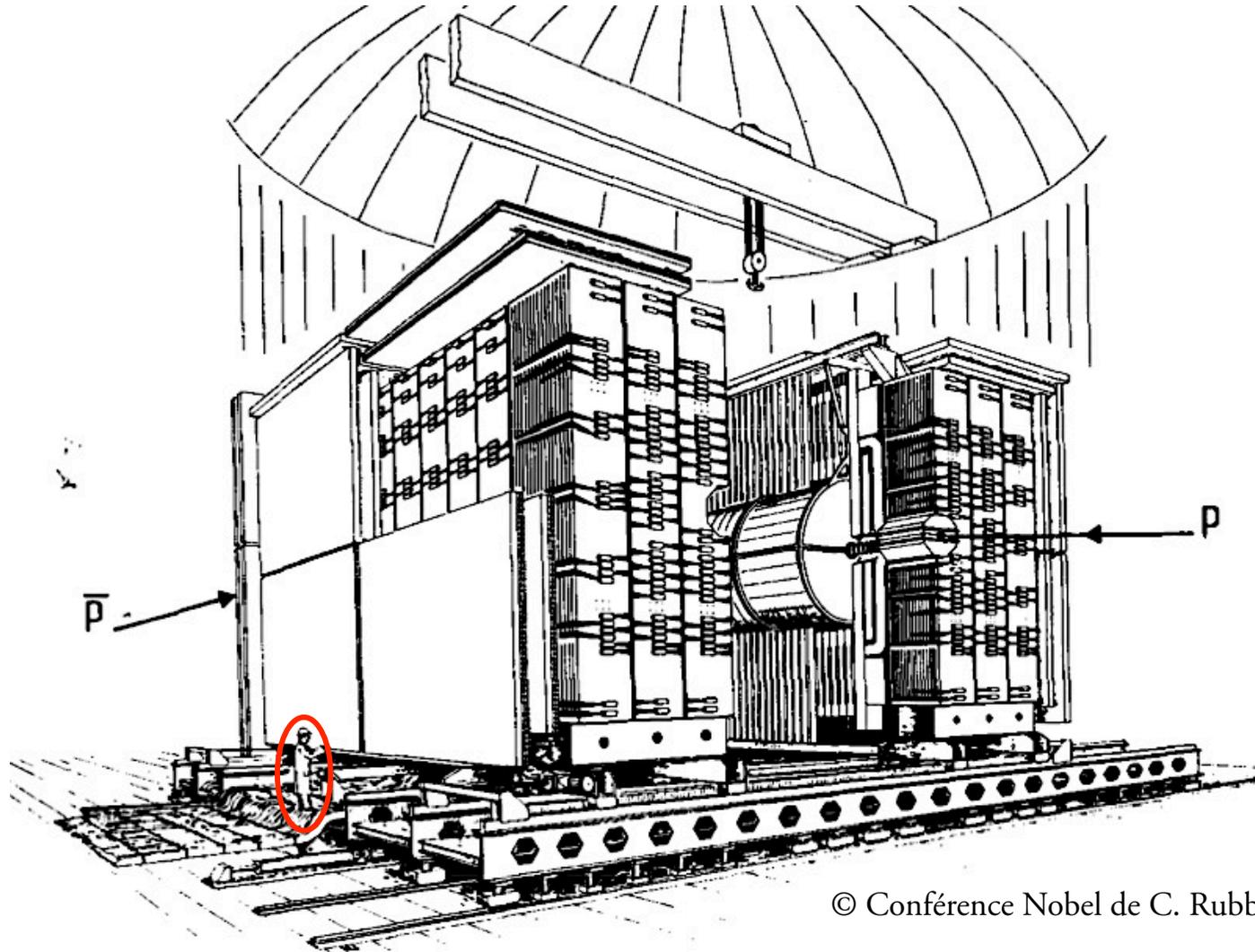


UA-1 et UA-2

- 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 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$
 - ➔ $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$



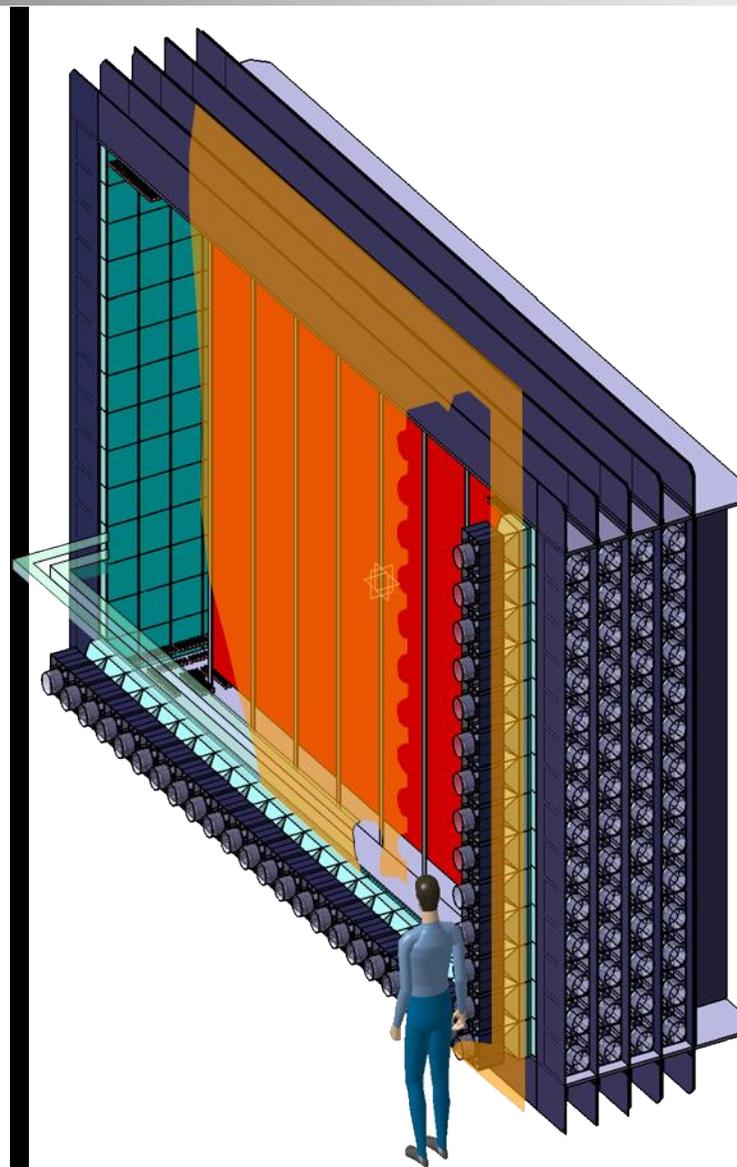
UA-1



© Conférence Nobel de C. Rubbia (1984)

Chambre multifils proportionnelle

- Georges Charpak (1968)

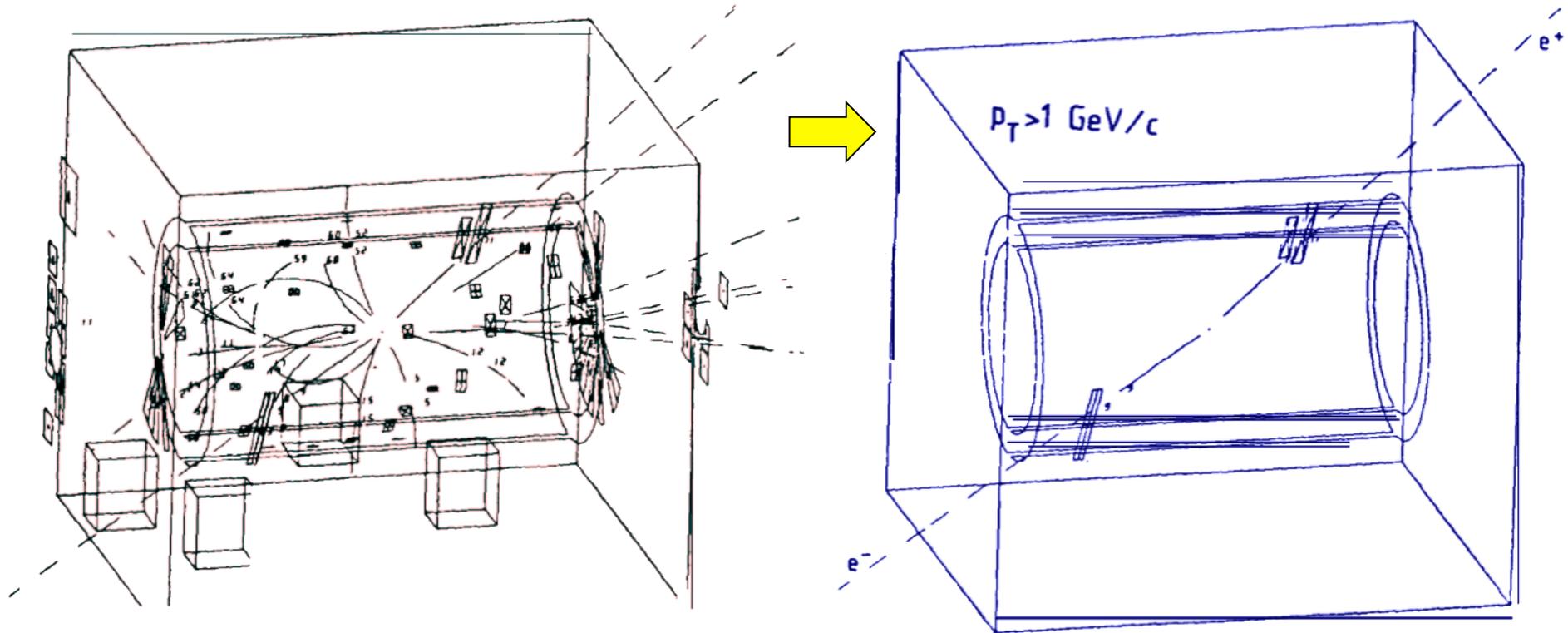


$W \rightarrow e \nu$ dans UA-1

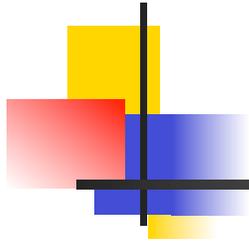


$Z^0 \rightarrow e^+e^-$ dans UA-1

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

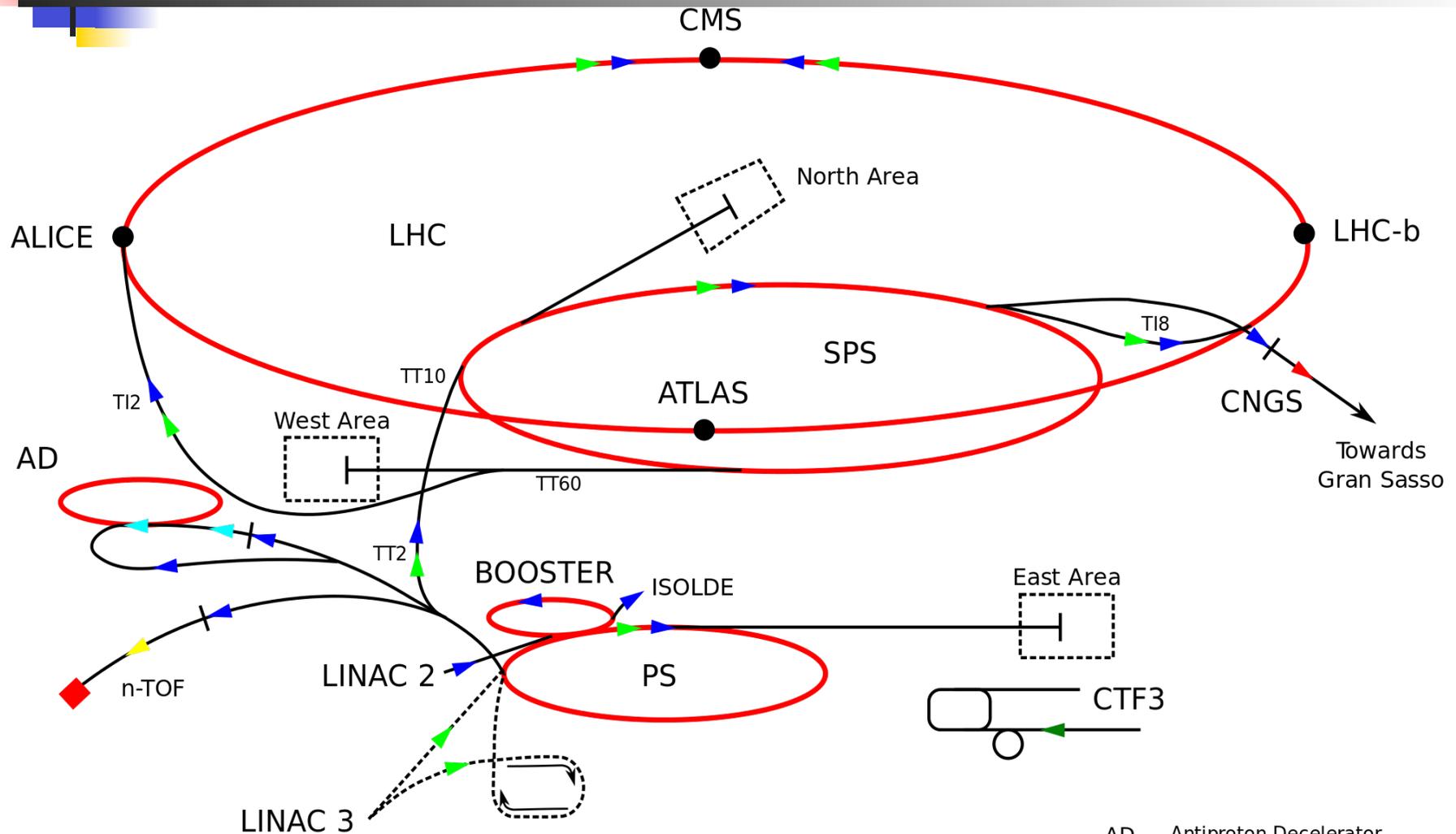


© Conférence Nobel de C. Rubbia (1984)



LEP ET LHC

Les accélérateurs du CERN (en 2013)



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

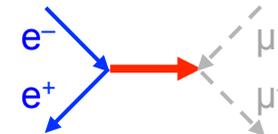
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron
- LHC Large Hadron Collider

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

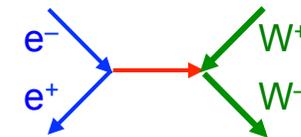
- Accélérateur électron-positron

- 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?~~)

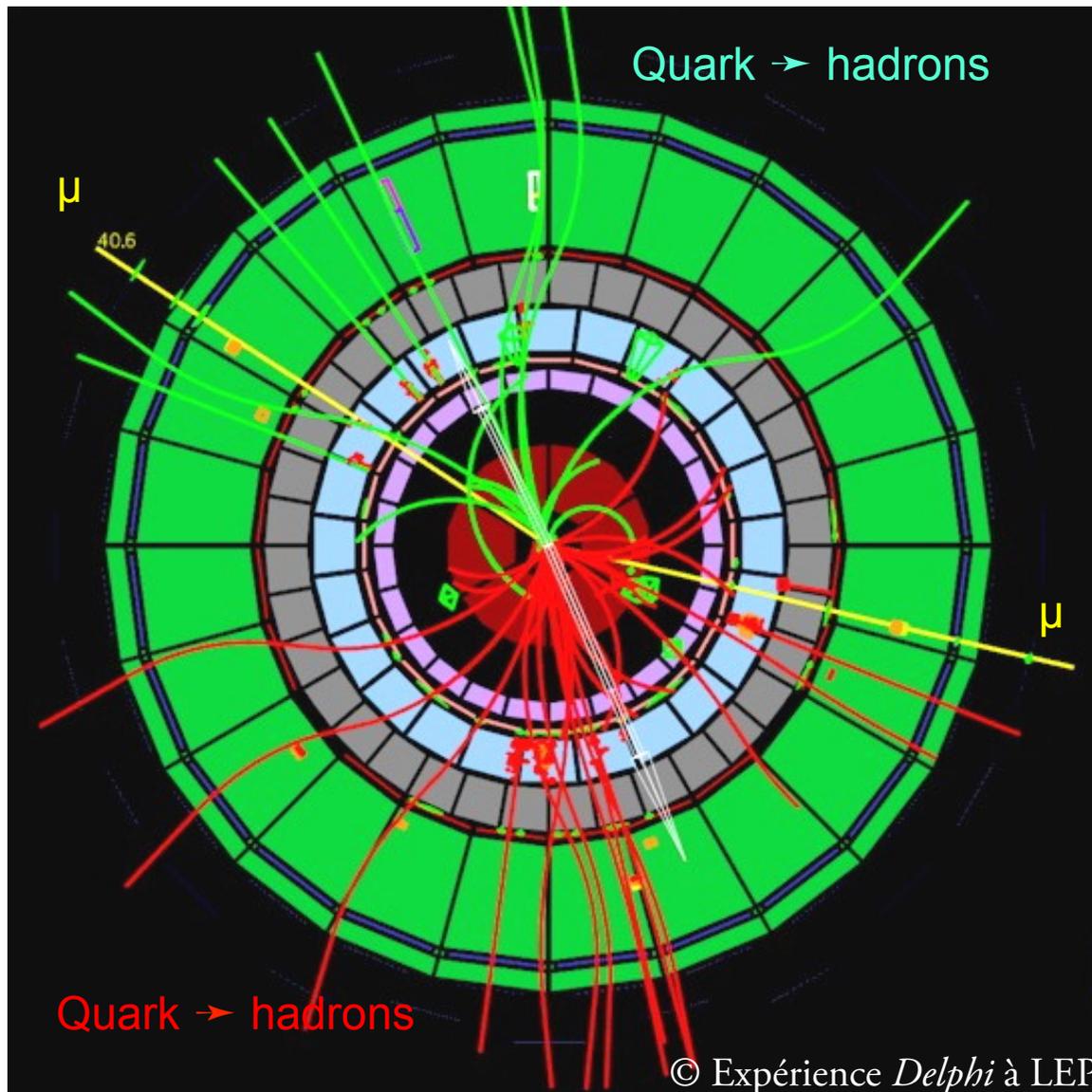
- Quatre détecteurs, et quatre expériences complémentaires

- Aleph
- Delphi
- L3
- Opal



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

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



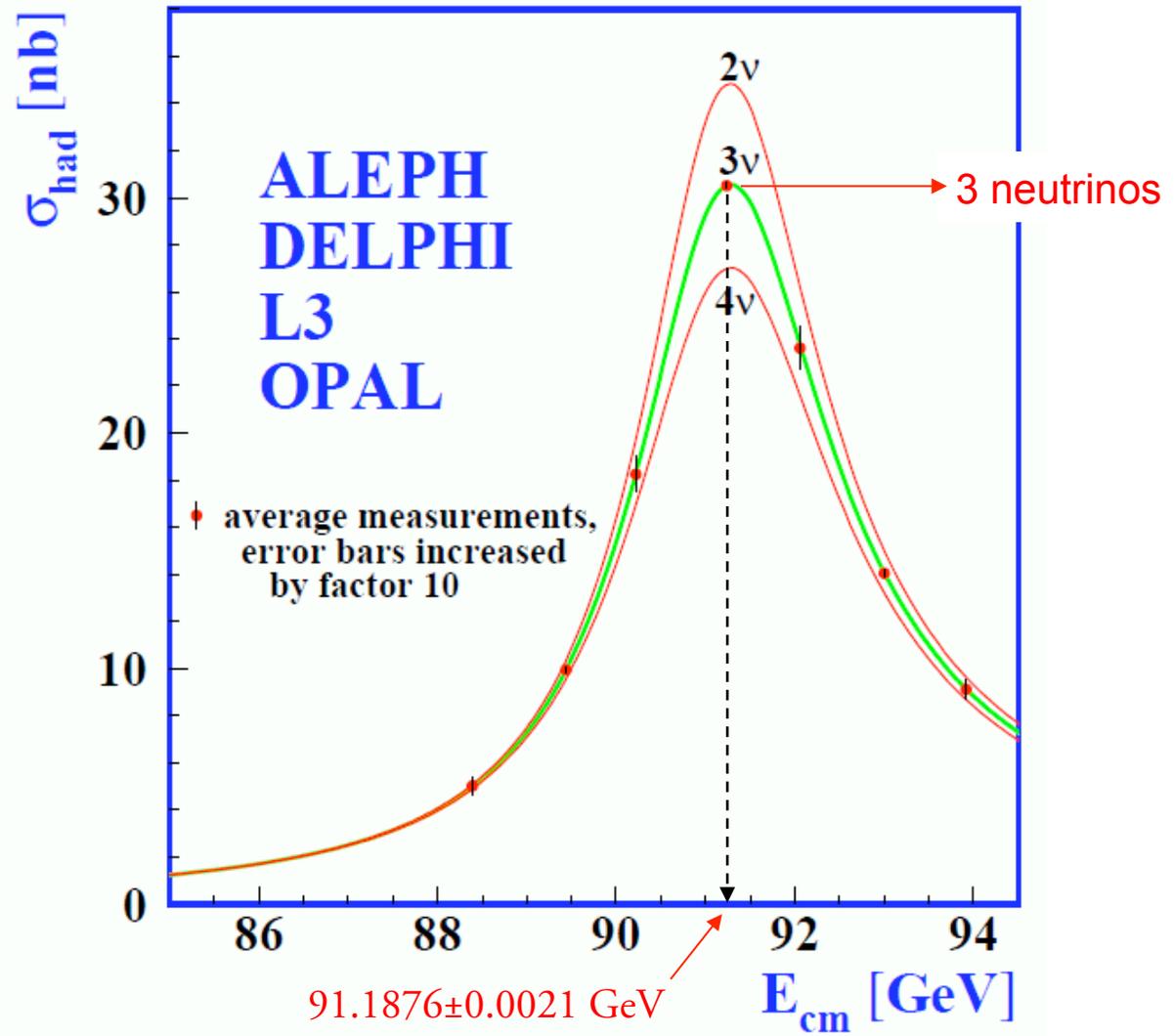
La masse et la largeur du Z^0

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

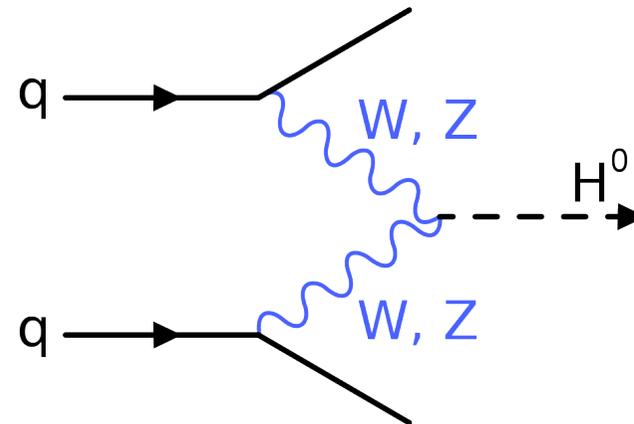
$$N_\nu = 2.994 \pm 0.012$$



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

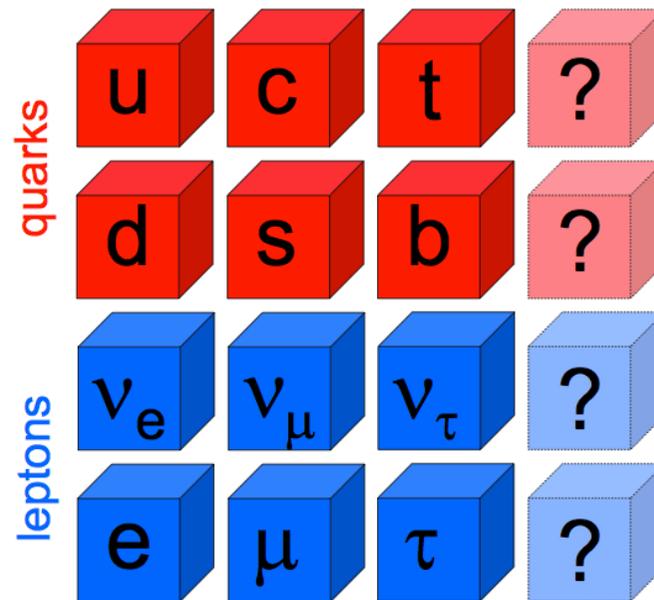


- Réflexions sur un supercollisionneur > Tevatron de Fermilab dès 1984
 - CERN : décision de réemployer le tunnel de 27 km du LEP pour un collisionneur proton-proton avec une énergie de $2 \times 7 \text{ TeV}$ (2×4 en 2013) → mise en route en 2008 (coût 3 G€)
 - USA : construction d'un *Superconducting 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^o génération ?

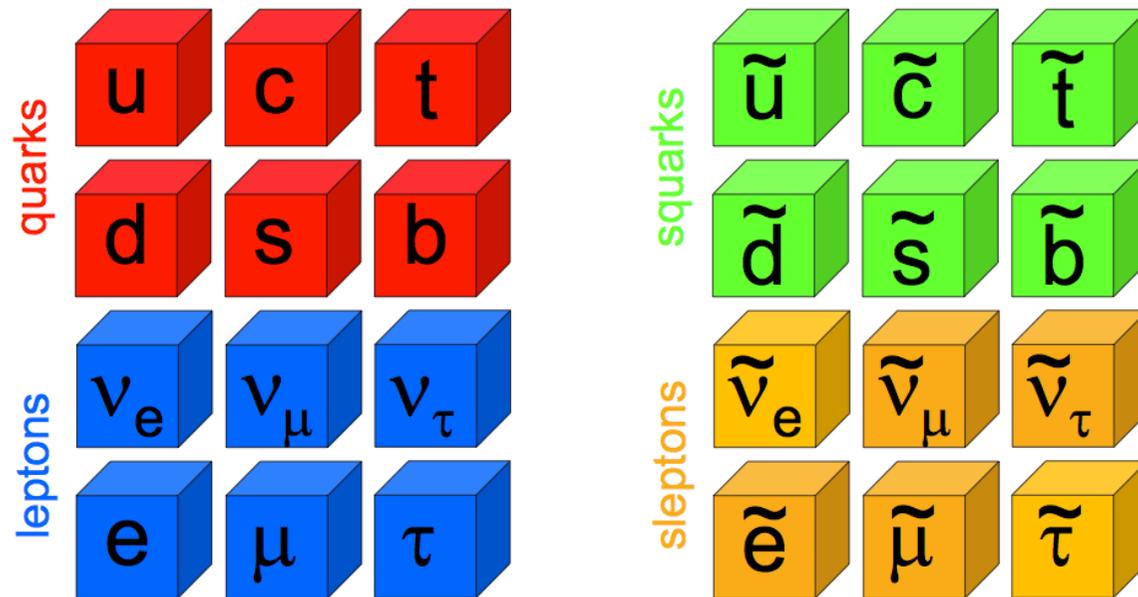
- Contraintes très fortes
 - Cosmologie : 3 particules de masse nulle (ou négligeable) lors de la nucléosynthèse
 - LEP : largeur du Z^0 → nombre de neutrinos = 2.994 ± 0.012



- Mais le LHC en recherche les traces éventuelles

Et la supersymétrie ?

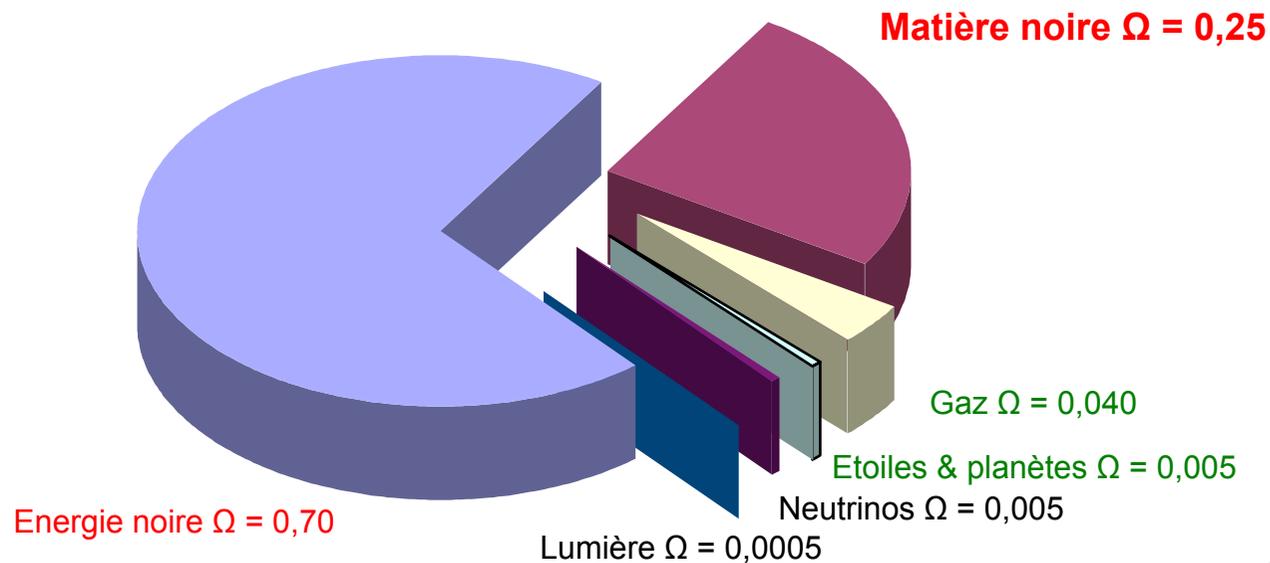
- À chaque fermion son boson
- À chaque boson son fermion



- **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

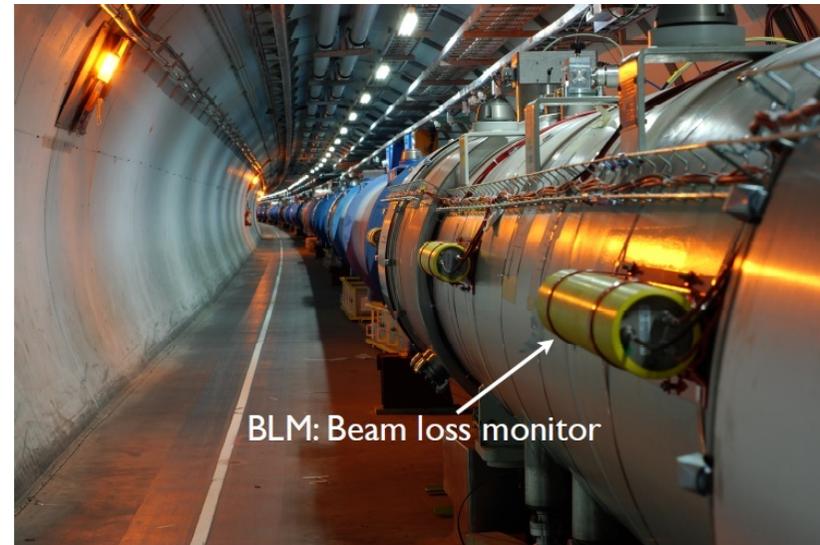
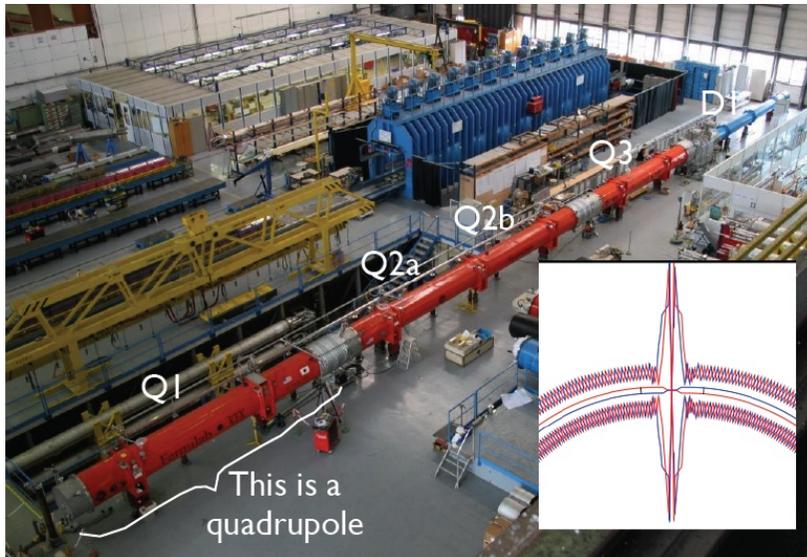
- Observations astronomiques \Rightarrow l'essentiel de la matière de l'univers n'est pas formée de quarks et de leptons
 - *Ou alors il faut revoir les concepts de base de la physique et modifier la loi fondamentale de la dynamique $F = m \gamma$*



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

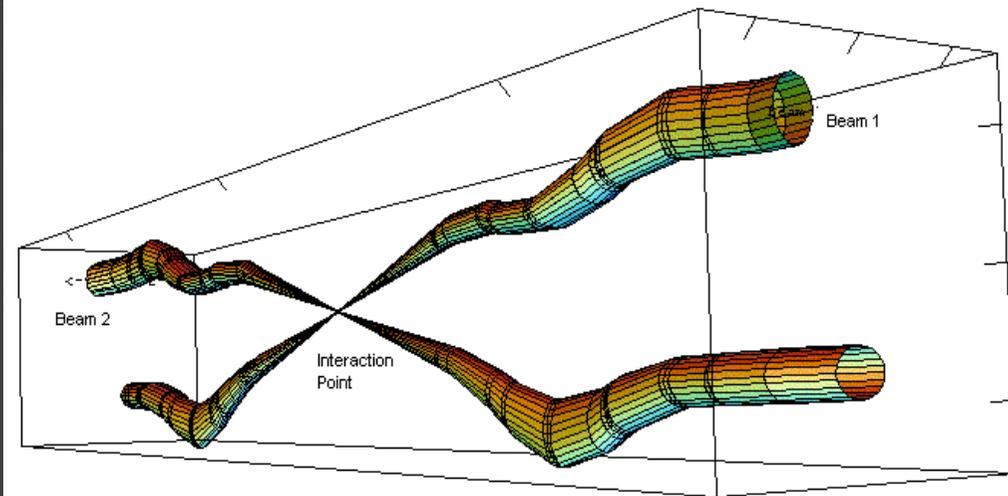






Les faisceaux de protons du LHC

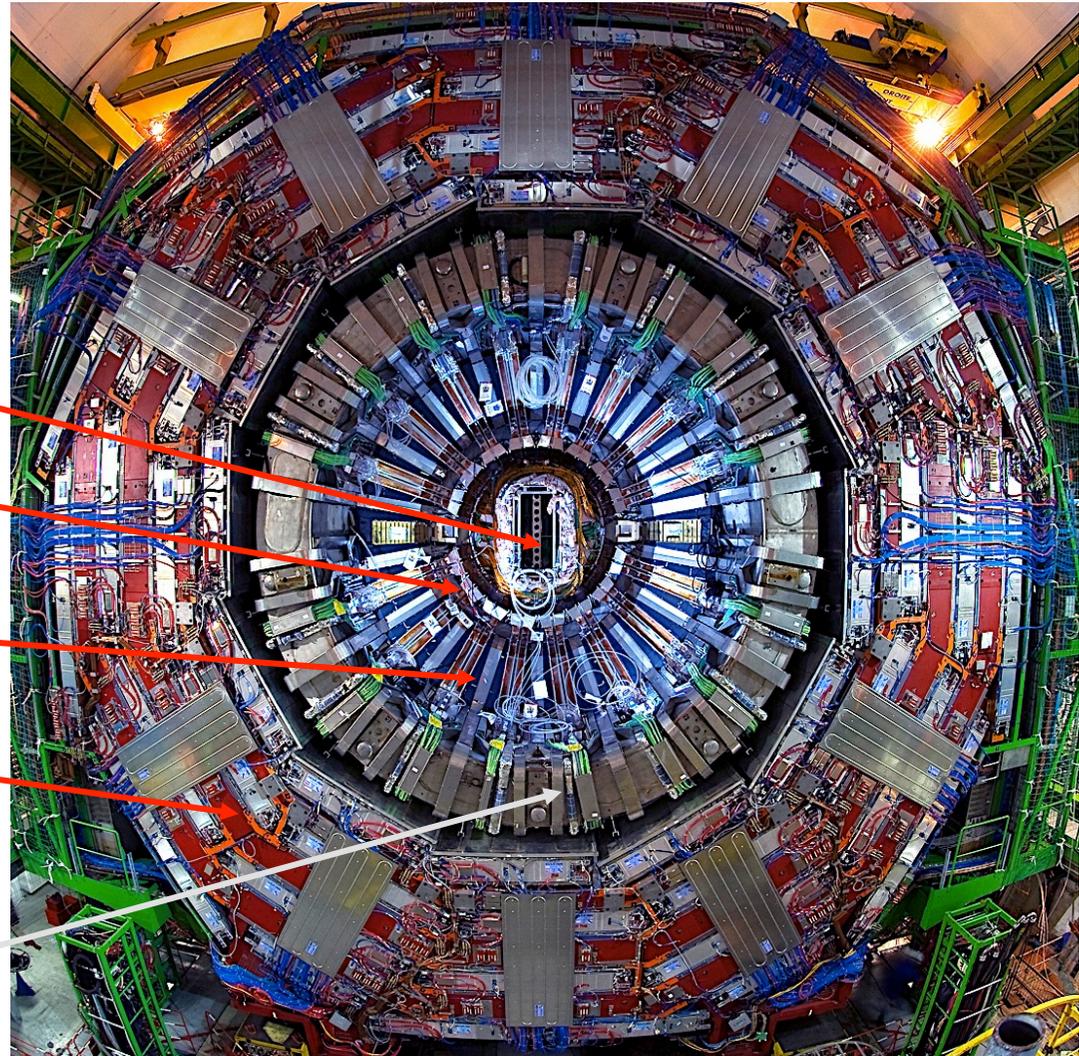
- Deux faisceaux de 3.5 TeV chacun, en sens inverse ➔ 7 GeV (en 2012)
- 1400 paquets de 10^{11} protons chacun, dans chaque sens (15 millions de croisements de paquets par seconde)
- Un paquet : quelques cm de long, quelques mm de diamètre, réduits à quelques microns aux points d'intersection
- ➔ 10^9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



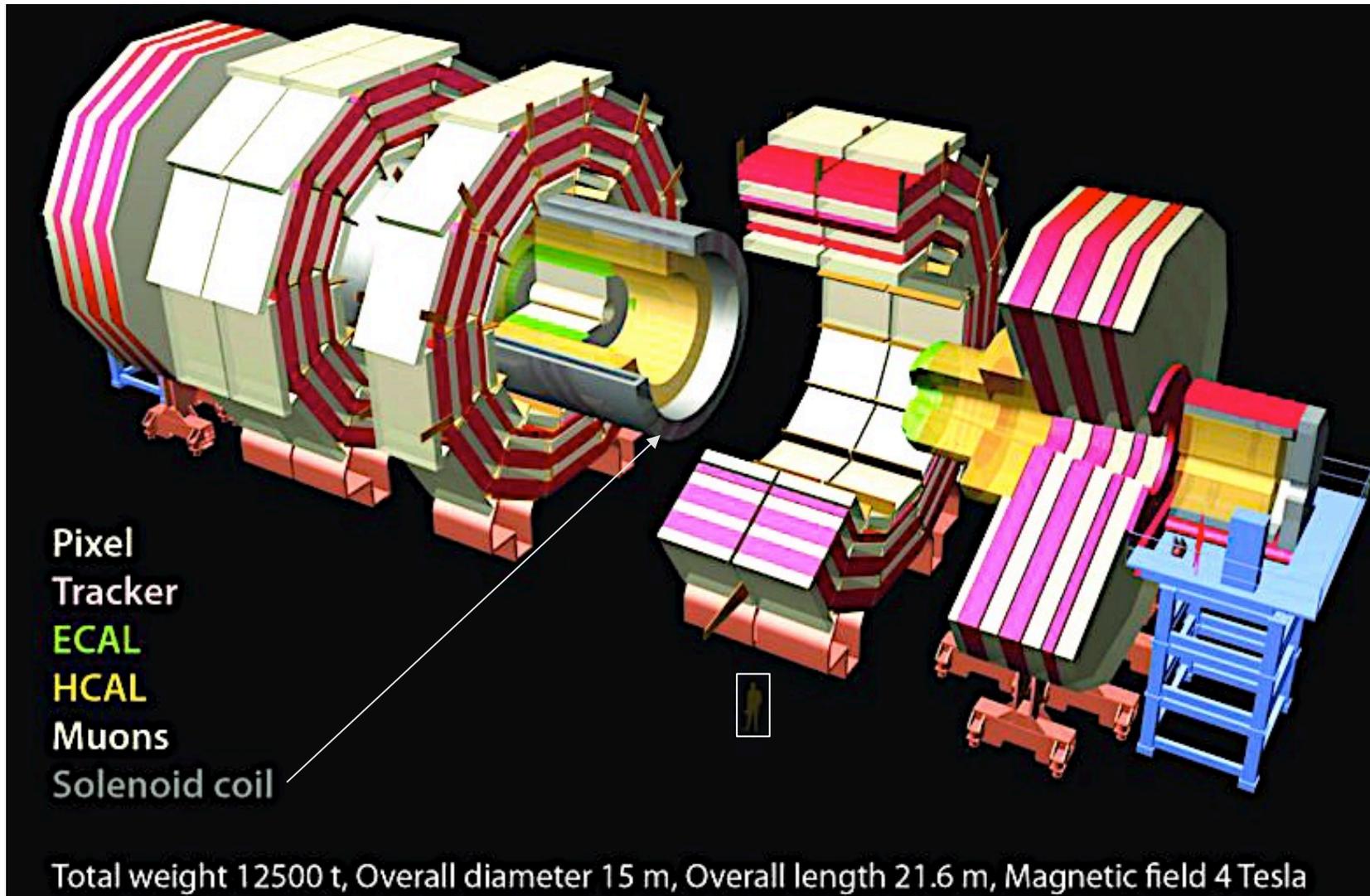
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

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

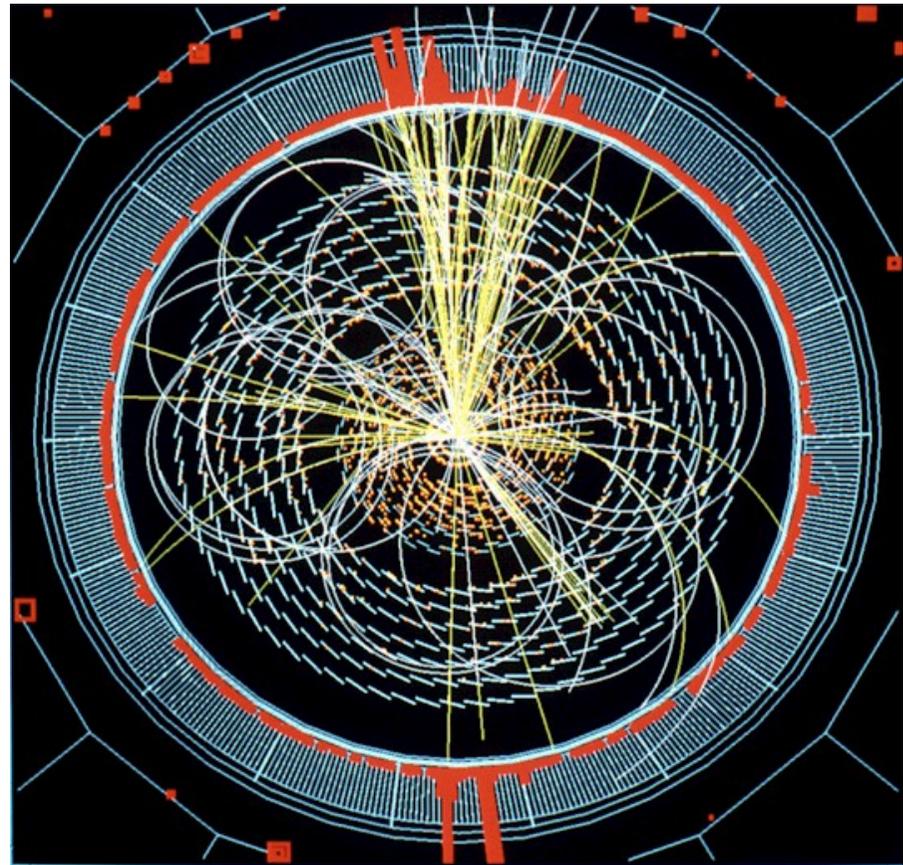
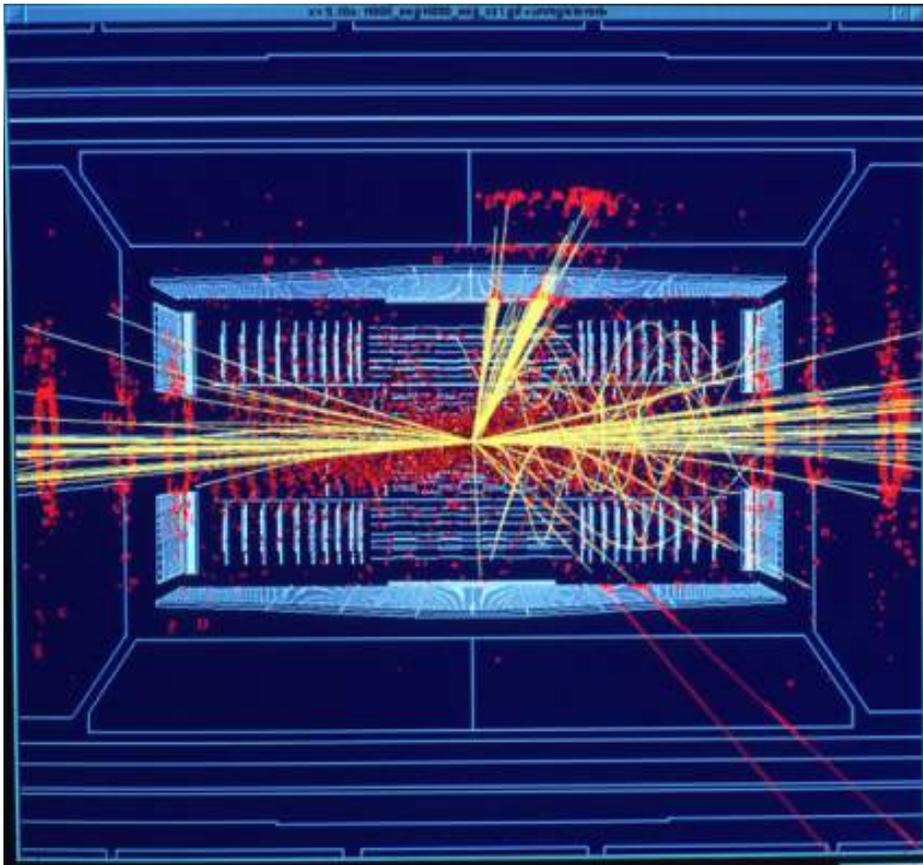


Un détecteur contemporain : CMS au LHC

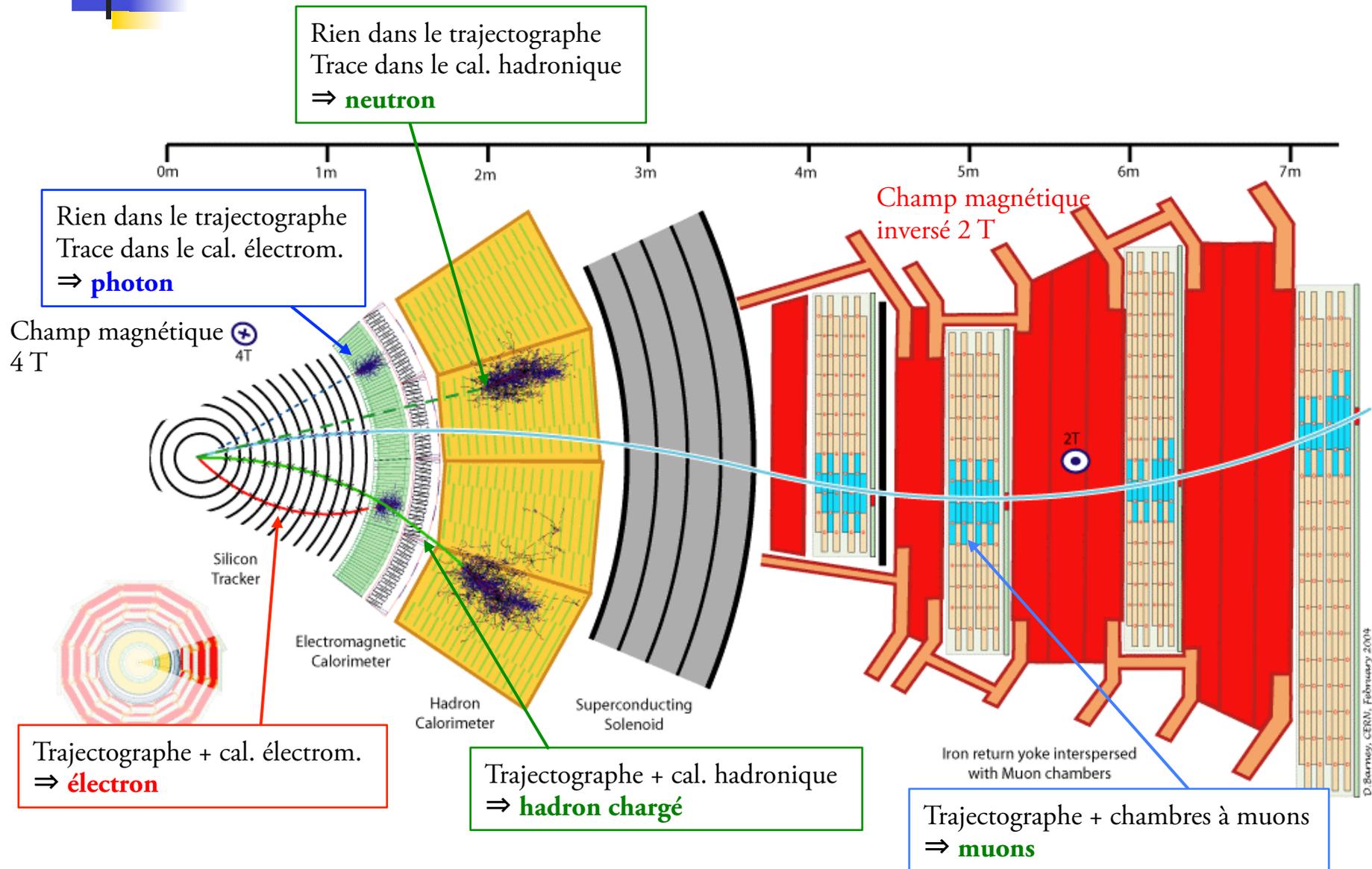


Simulation de Higgs dans CMS au LHC

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



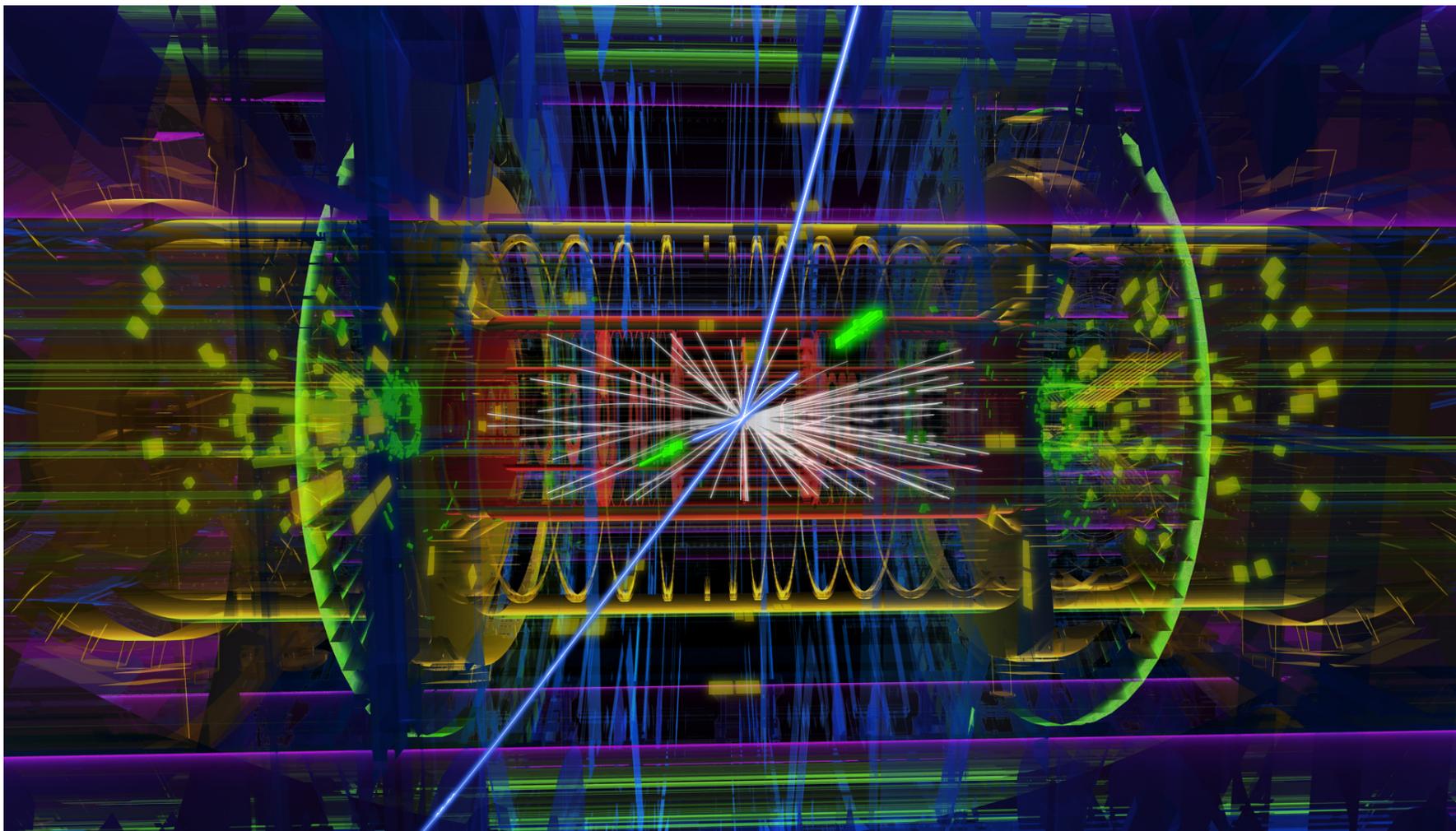
Comment ça marche ?



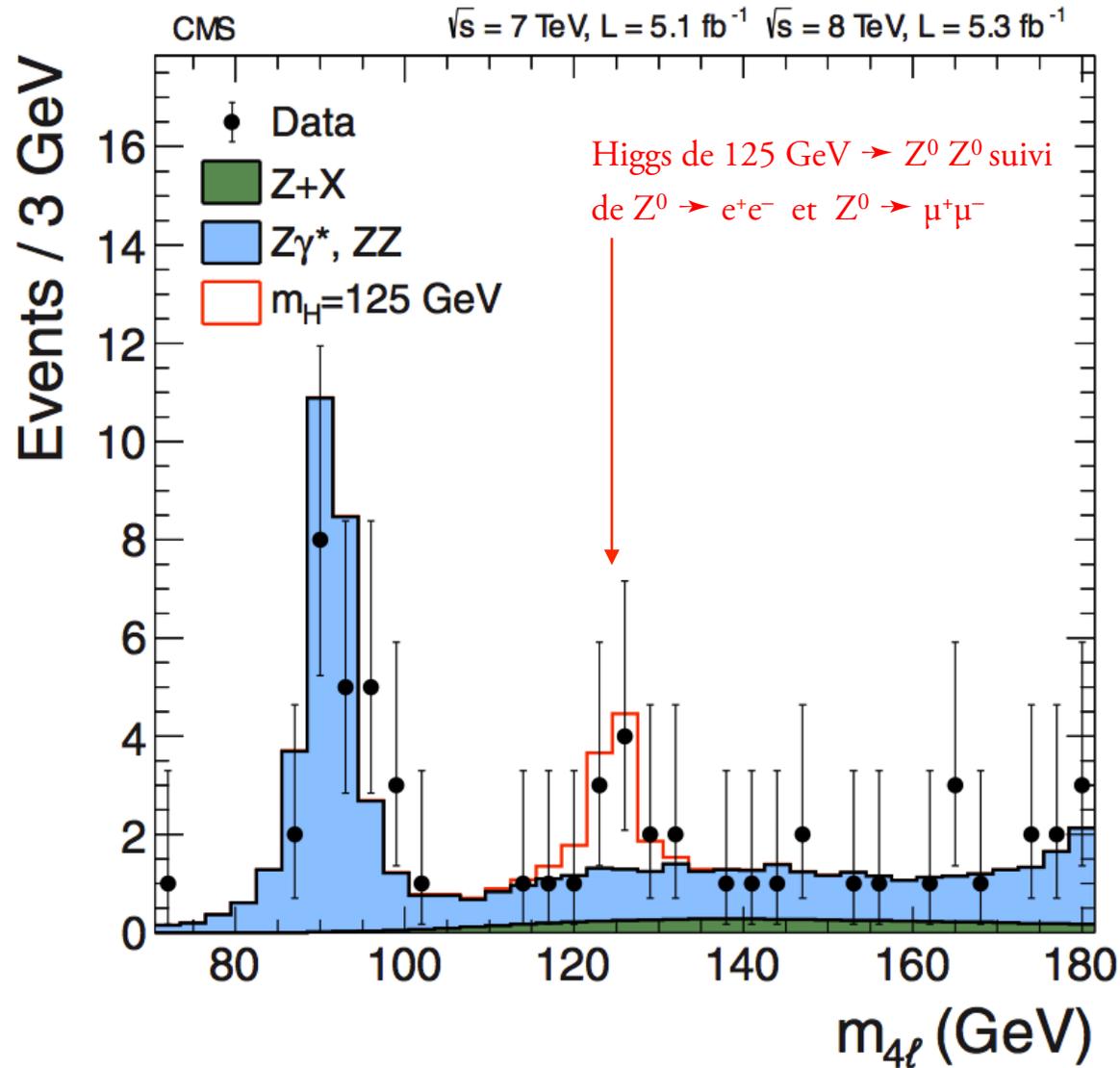
D Barney, CERN, February 2004

Le boson de Higgs ?

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

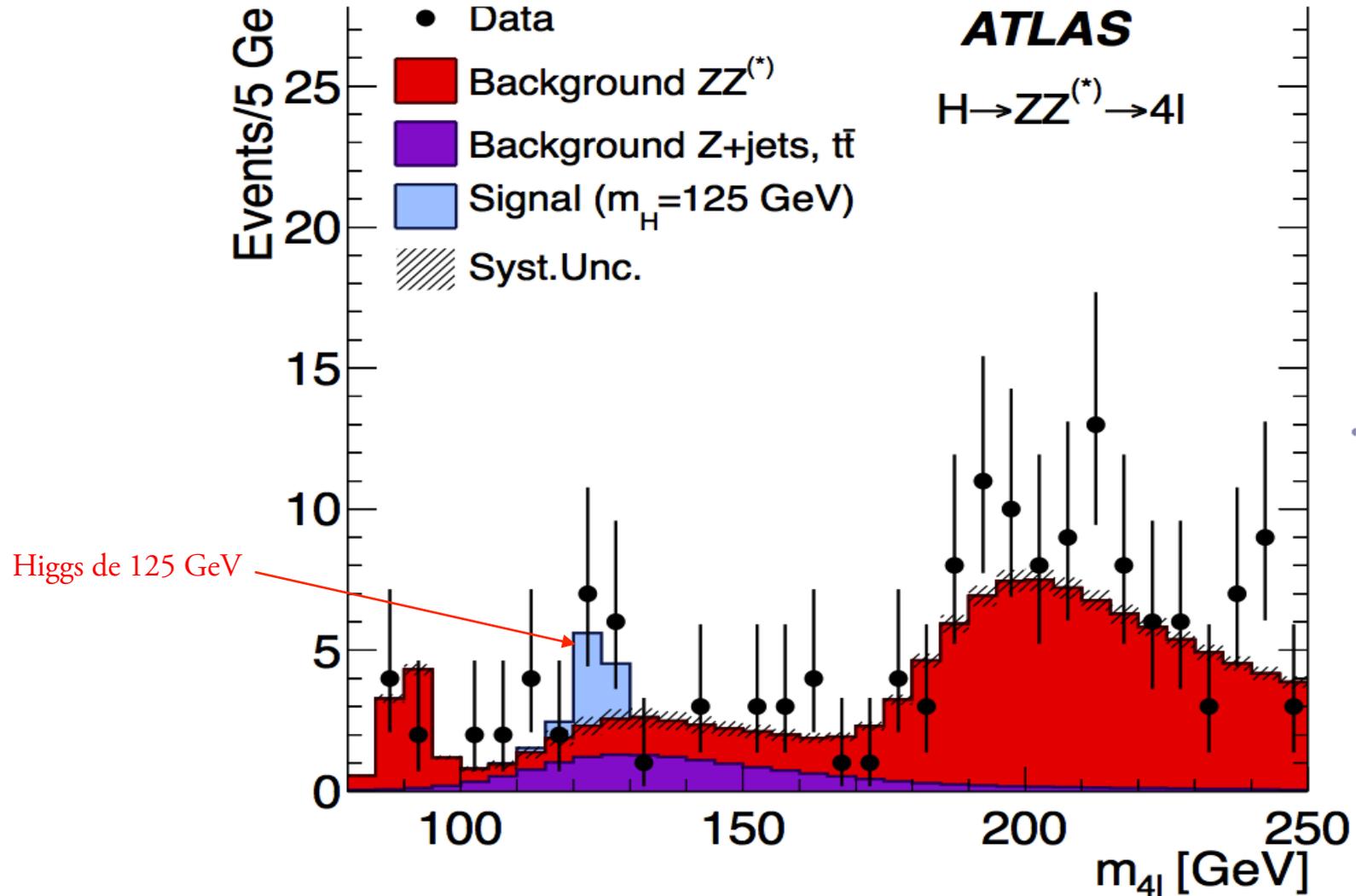


Masse invariante de 4 leptons [CMS]



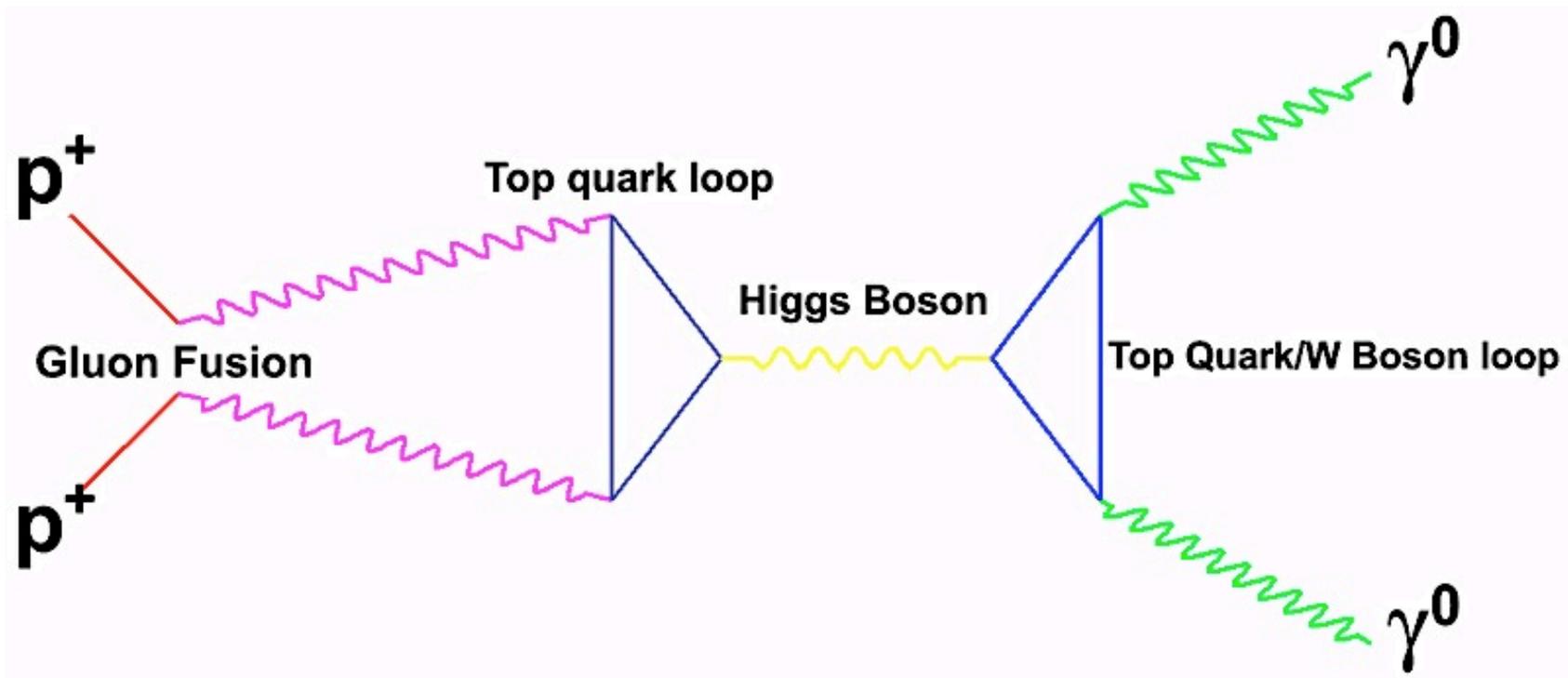
Masse invariante de 4 leptons [ATLAS]

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

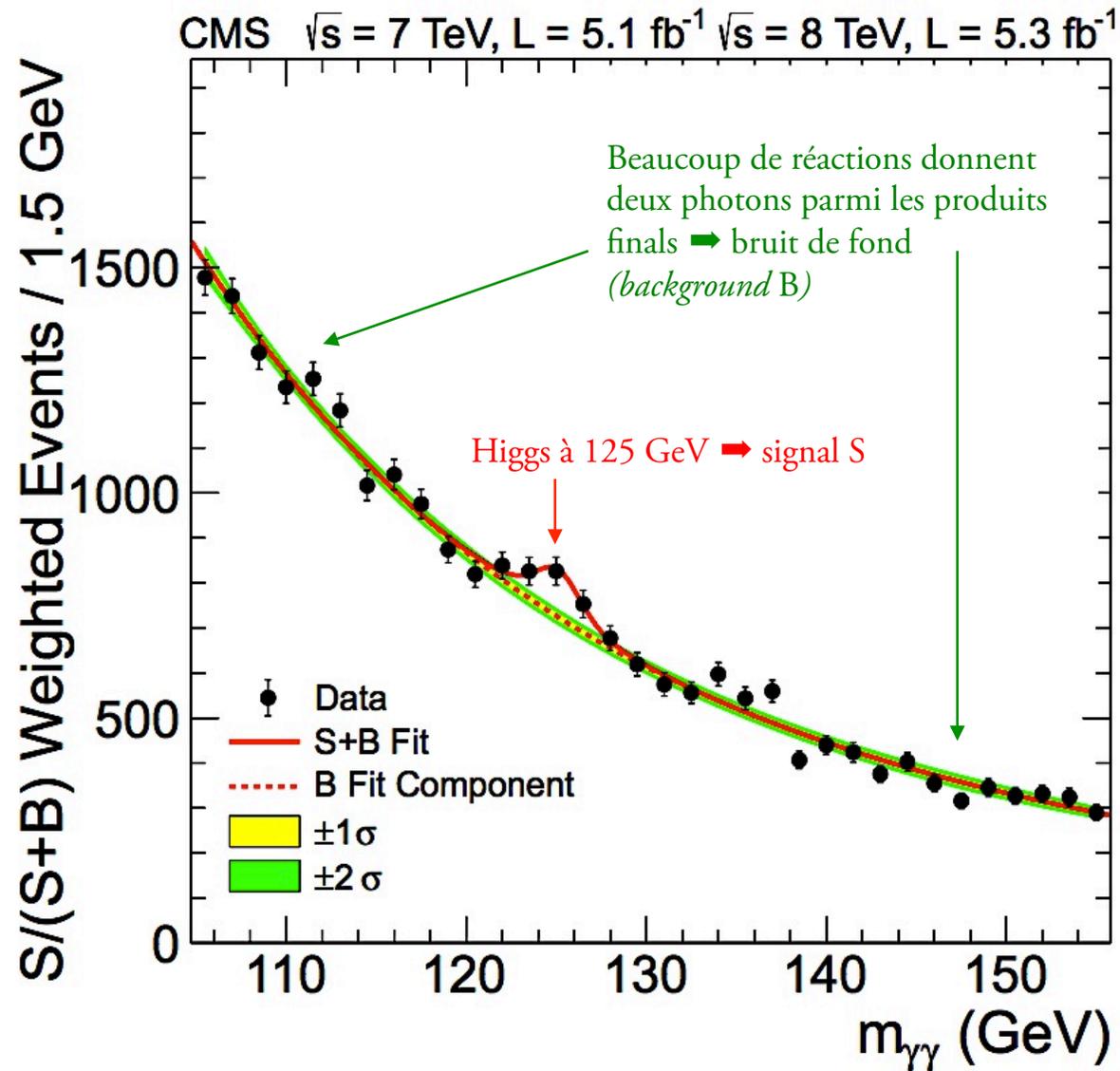


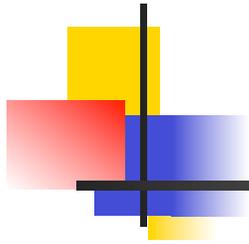
Une autre possibilité : $H^0 \rightarrow 2 \gamma$

- 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 !

