

Présentation destinée aux étudiants en physique
Mise à jour, 12 novembre 2008

Un peu de physique avec le détecteur ALEPH au LEP

Olivier Schneider



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

**Laboratoire de Physique
des Hautes Energies (LPHE)**

Olivier.Schneider@epfl.ch

Théorie électro-faible

■ Maxwell (~1864):

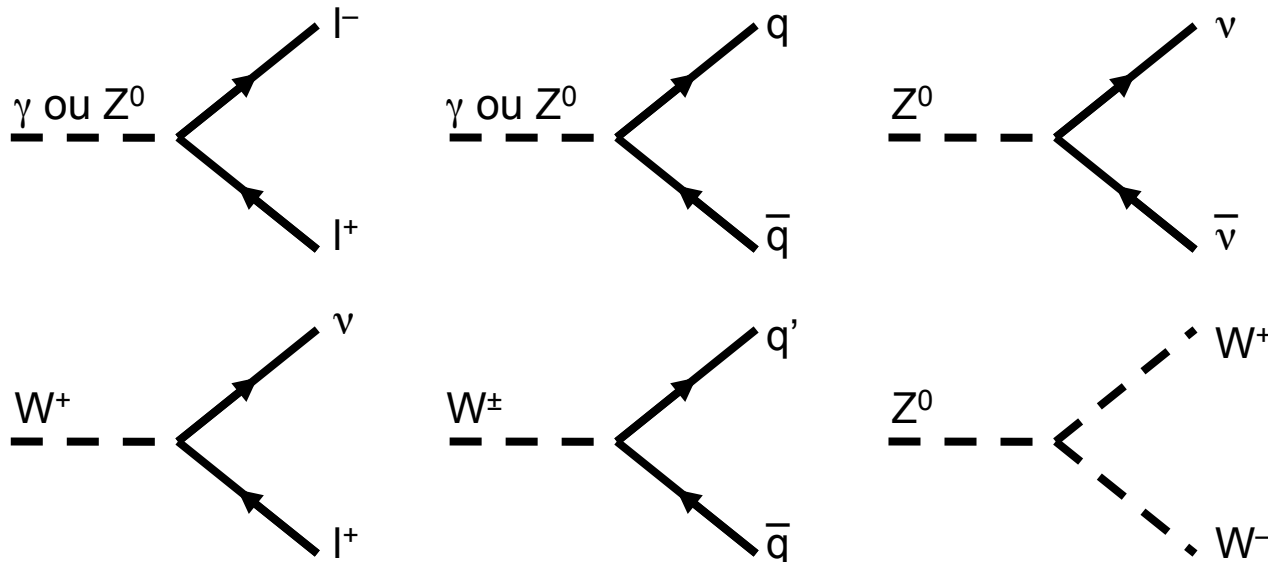
—électromagnétisme: unification des forces électriques et magnétiques

■ Glashow, Weinberg et Salam (1961–1968):

—théorie électro-faible: unification des forces électromagnétique et faible

—4 bosons d'échange: γ , Z^0 , W^+ , W^-

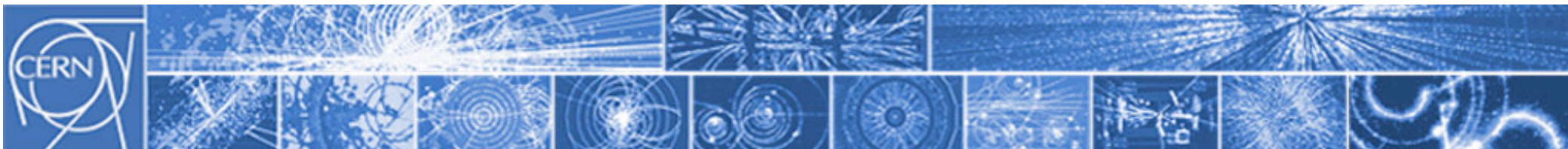
—couplages possibles (diagrammes de Feynman):



q = quark
l = lepton chargé
 ν = neutrino

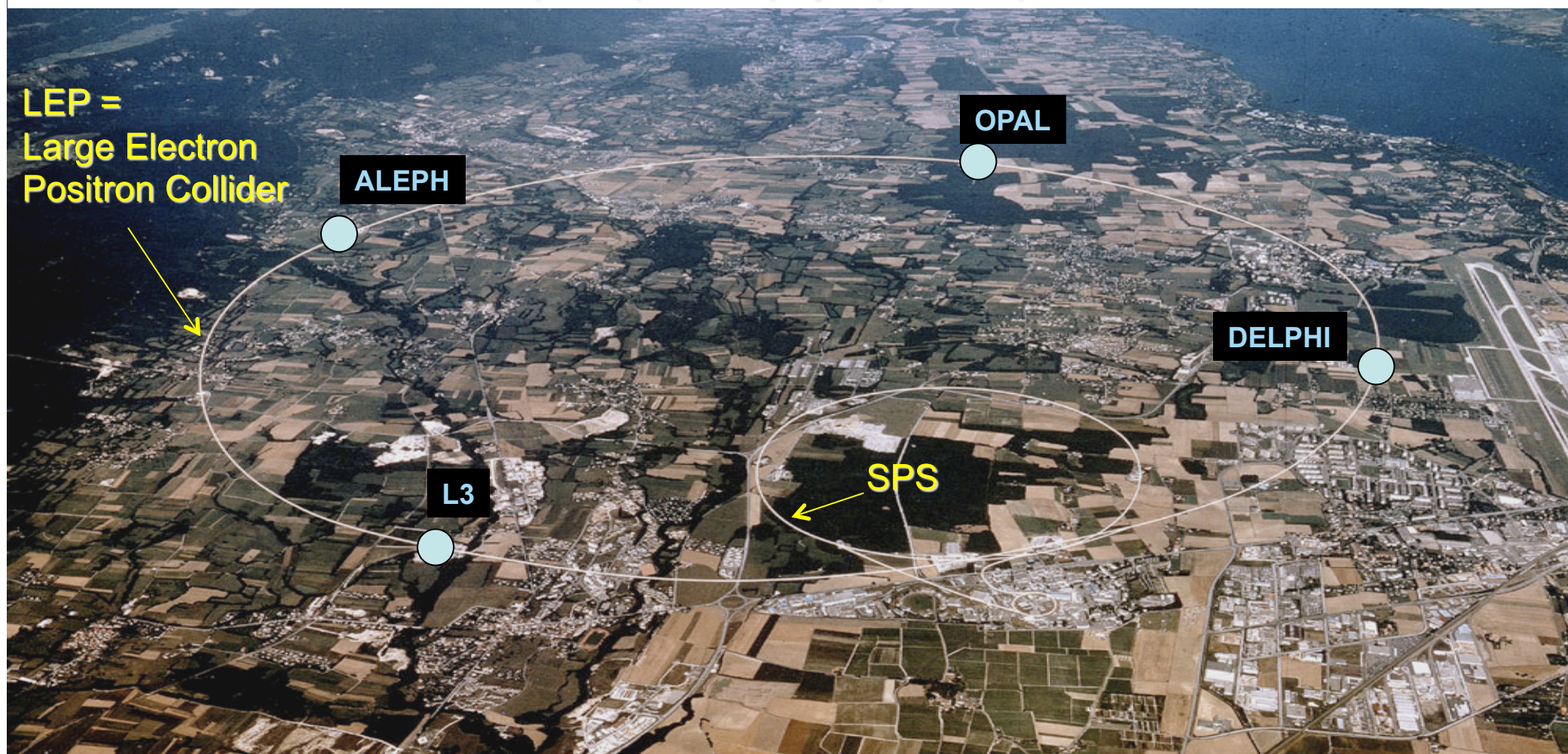
Le LEP

- **LEP** = « Large Electron-Positron collider »
- Grand collisionneur électron-positon du CERN (synchrotron):
 - 27 km de circonférence
 - tunnel et accélérateur construits à partir de 1983
 - entré en fonction en 1989, arrêté en 2000
- 4 grands détecteurs similaires construits et utilisés au LEP:
 - **ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL**
 - but principaux:
 - étudier en détail les **bosons Z^0 et W^\pm** (particules d'échange de la force nucléaire faible) découverts en 1983 au collisionneur proton-antiproton (SPS = super synchrotron à protons) du CERN
 - recherche du **boson de Higgs**, particule responsable de la masse des Z^0 et W^\pm (et également de toutes les autres particules)
 - recherche de nouvelle physique (par ex. particules supersymétriques)



CERN – Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Laboratoire européen pour la physique des particules



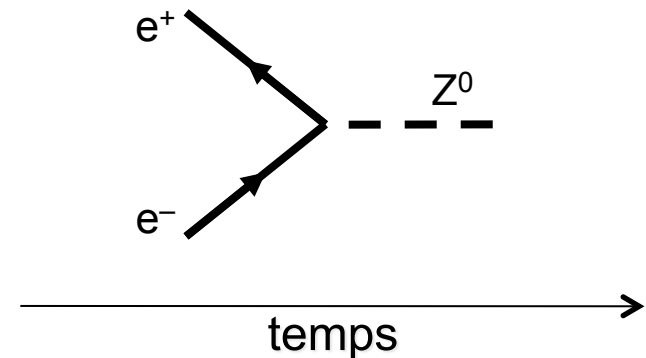
Recherche fondamentale – Formation et collaboration – Technologie et innovation

Le LEP en deux phases

□ LEP1 (1989–1995):

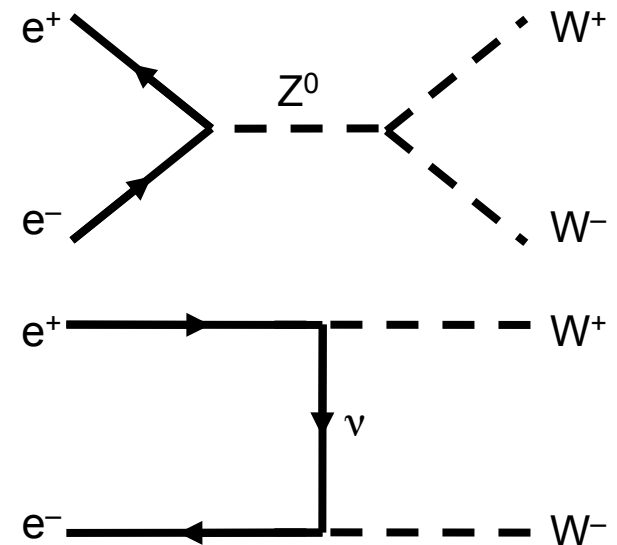
- collisions e^+e^- à $\sqrt{s} \sim m(Z^0) \sim 91.2$ GeV
- au total, plusieurs millions de Z réels produits dans chaque détecteur !

Diagrammes de Feynman

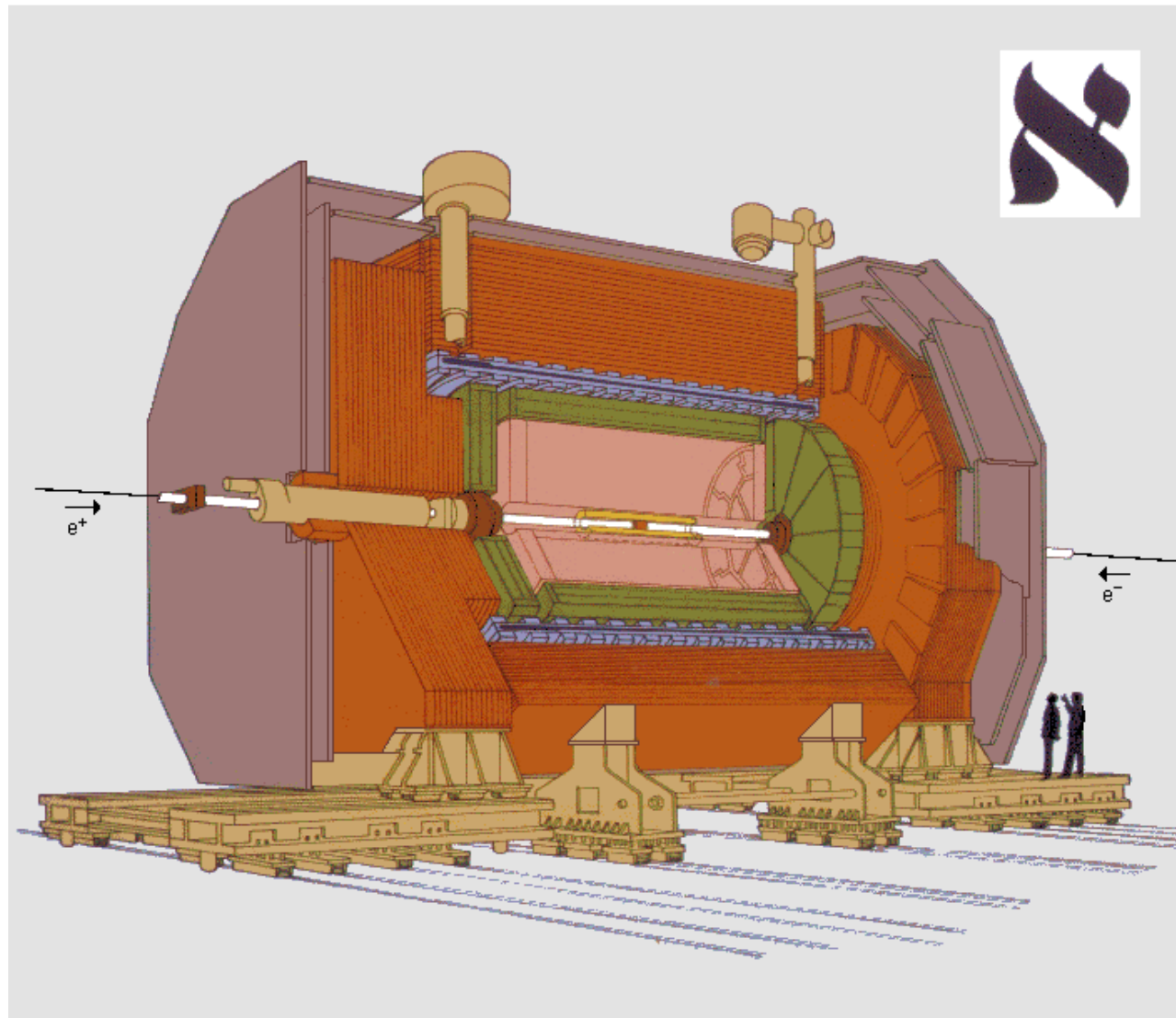


□ LEP2 (1996–2000)

- collisions e^+e^- à plus haute énergie
 - jusqu'à $\sqrt{s} \sim 209$ GeV (record)
- production de paires W^+W^- et Z^0Z^0 , ...
 - $m(W) \sim 80.4$ GeV
 - seuil de production W^+W^- : $\sqrt{s} \sim 160.8$ GeV
- recherche du Higgs et autres nouvelles particules ...



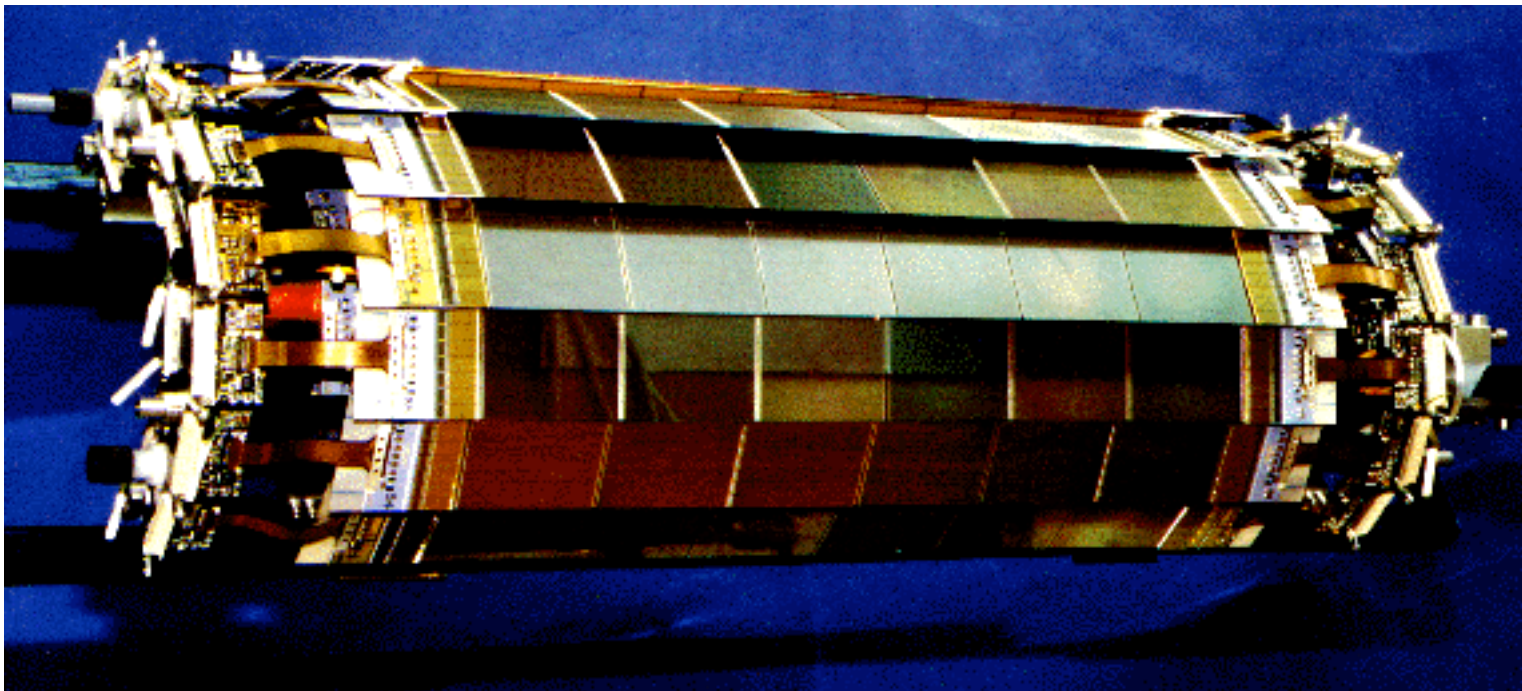
Le détecteur ALEPH



- Vertex Detector
- Inner Tracking Chamber
- Time Projection Chamber
- Electromagnetic Calorimeter
- Superconducting Magnet Coil
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers
- Luminosity Monitors

Le détecteur de vertex (VDET)

- ❑ Nouvelle version de 1995 (pour la phase 2):
 - longueur 40 cm (version 1 avait seulement 20 cm)
 - 2 couches concentriques de détecteurs au silicium entourant le point de collision e^+e^-
 - rayon = 6.3 cm (couche interne) et 11.0 cm (couche externe)

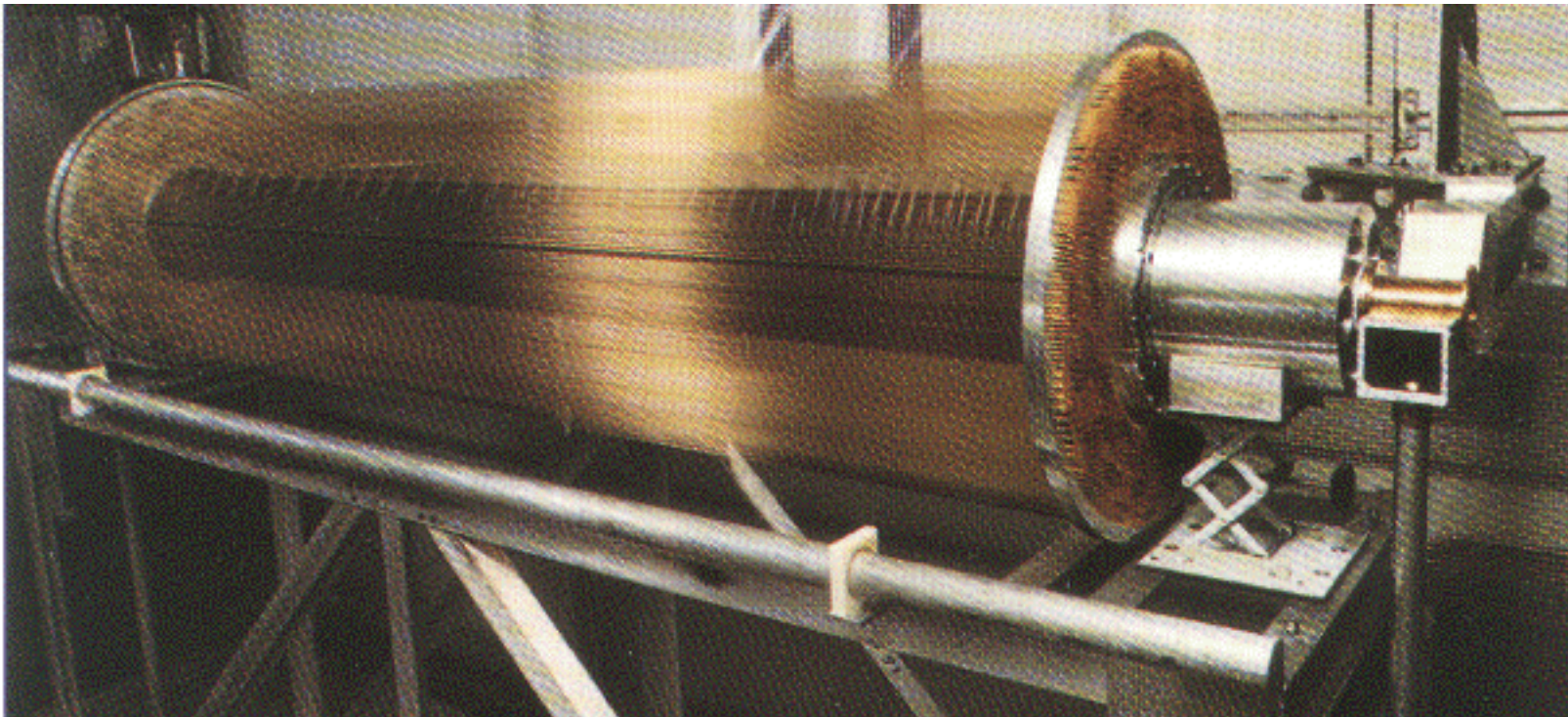


Inner tracking chamber

❑ Chambre à dérivation conventionnelle, entourant le détecteur de vertex

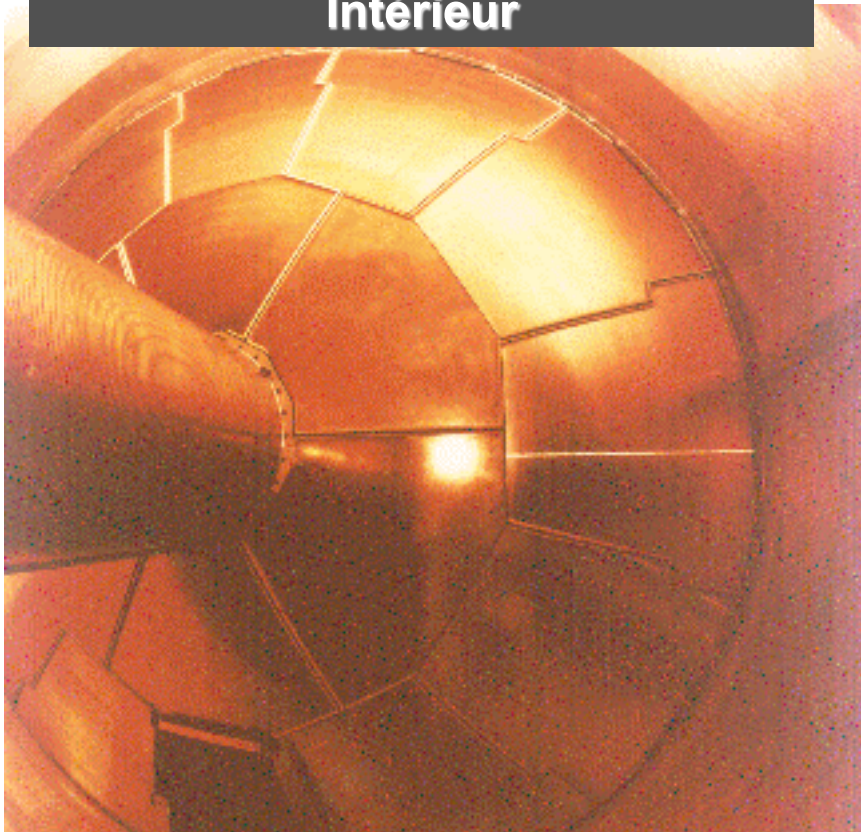
— longueur $\sim 2\text{m}$

— rayon de 12.8 à 28.8 cm

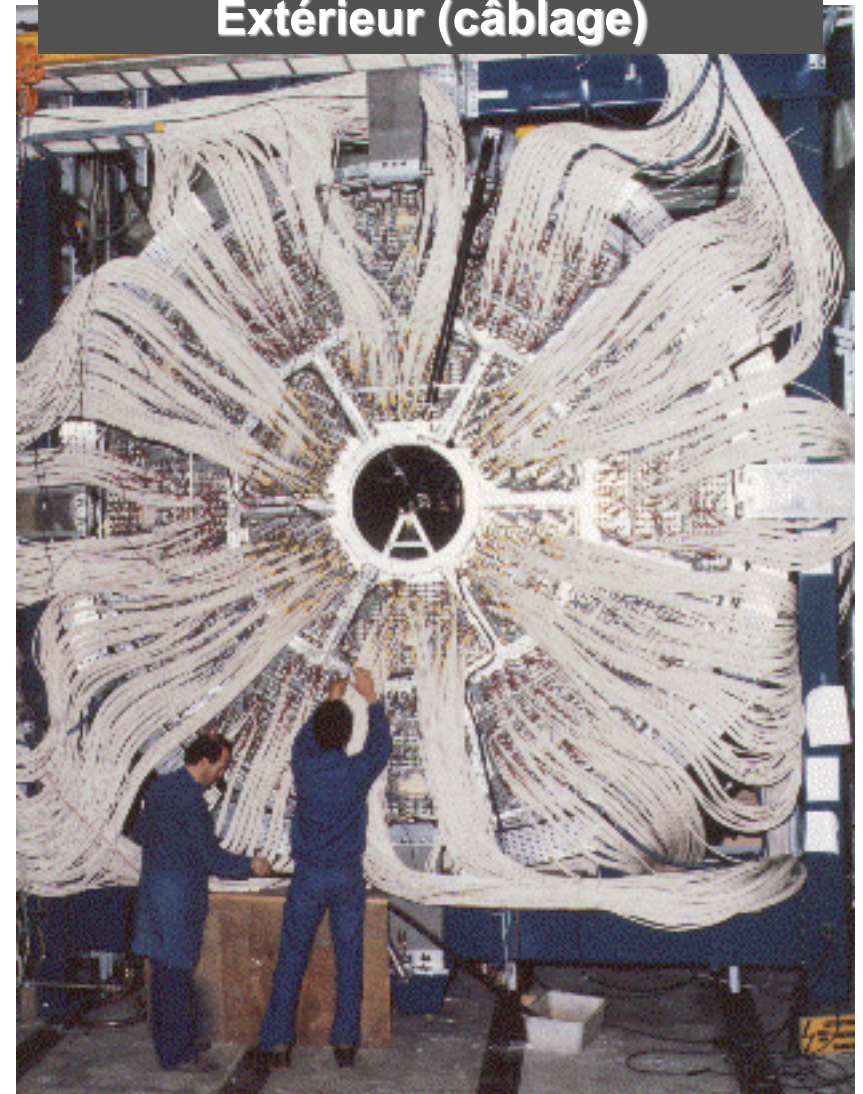


Chambre à projection temporelle (TPC)

Intérieur



Extérieur (câblage)



Aimant et calorimètres

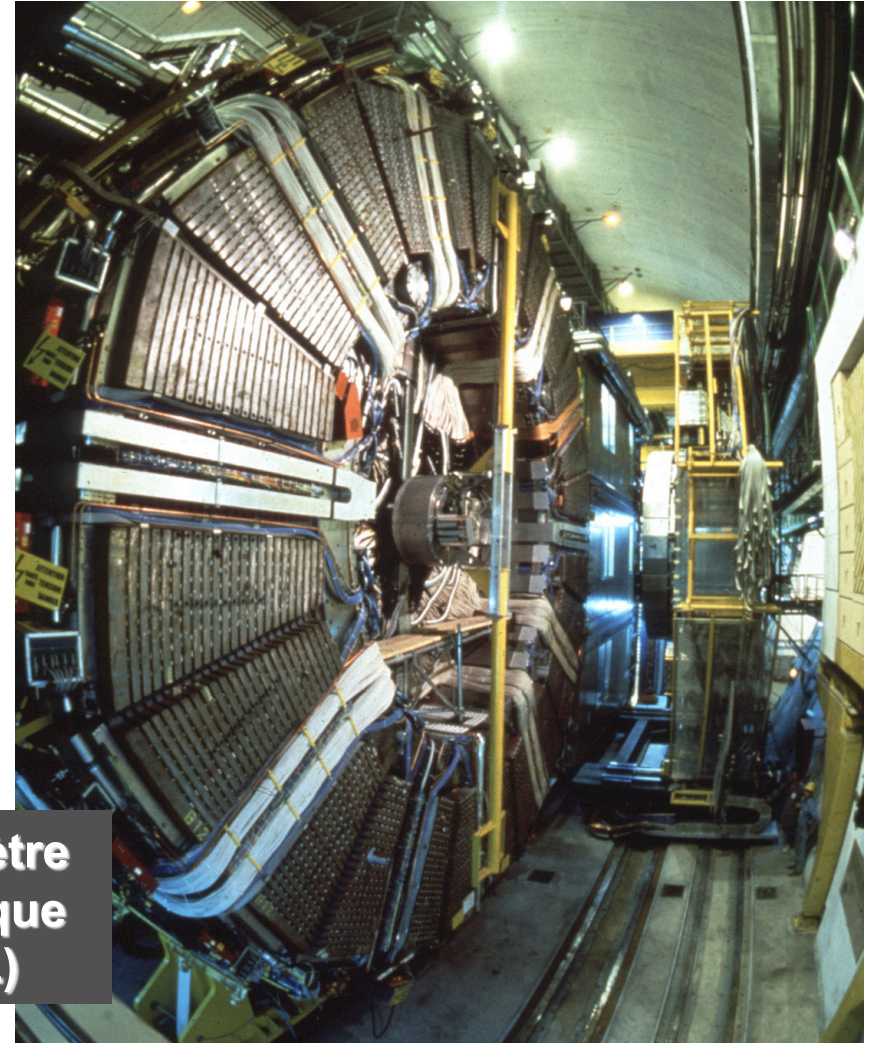
**Module du calorimètre
électromagnétique
(ECAL)**



**Aimant (bobine
supraconductrice)**

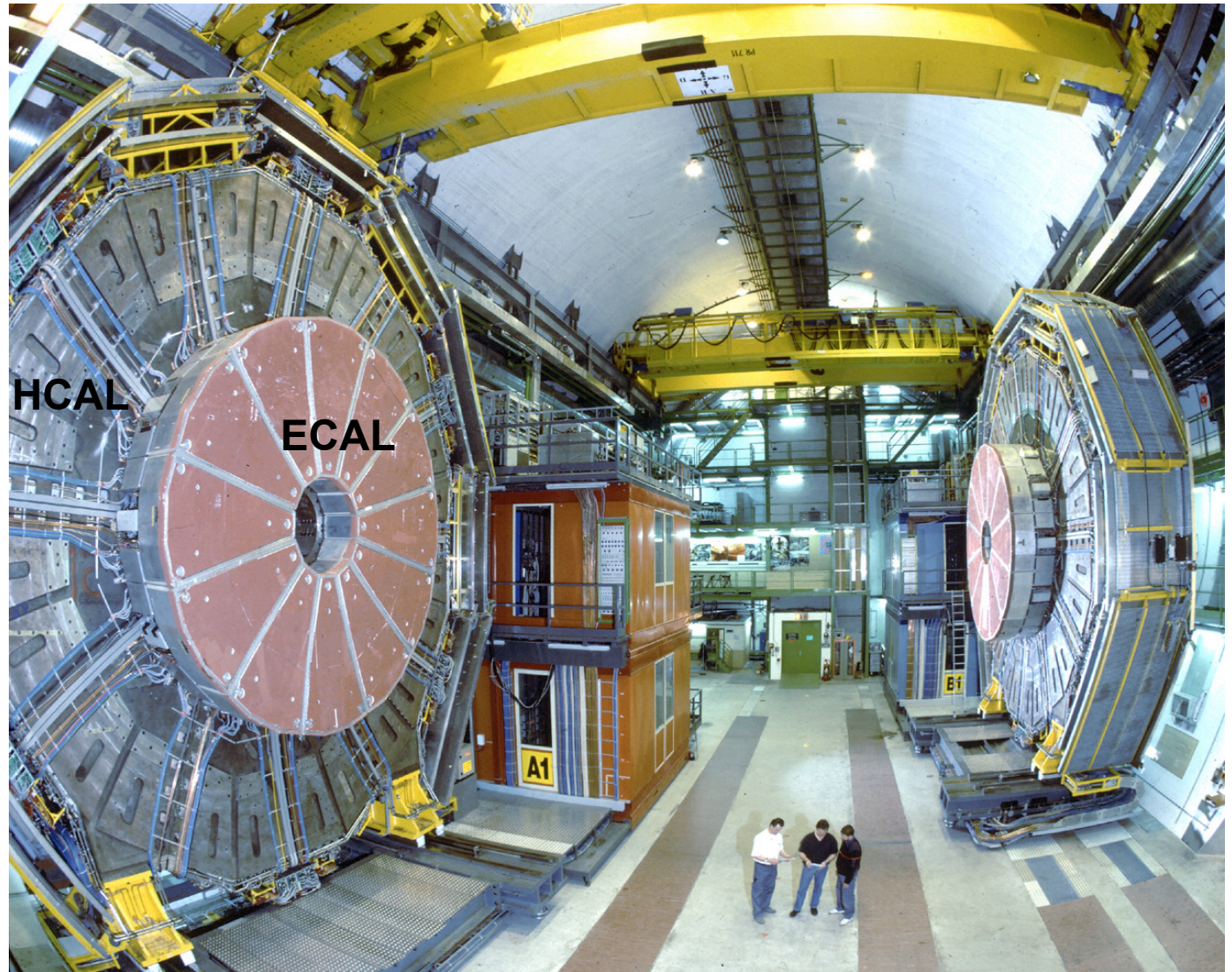


**Calorimètre
hadronique
(HCAL)**



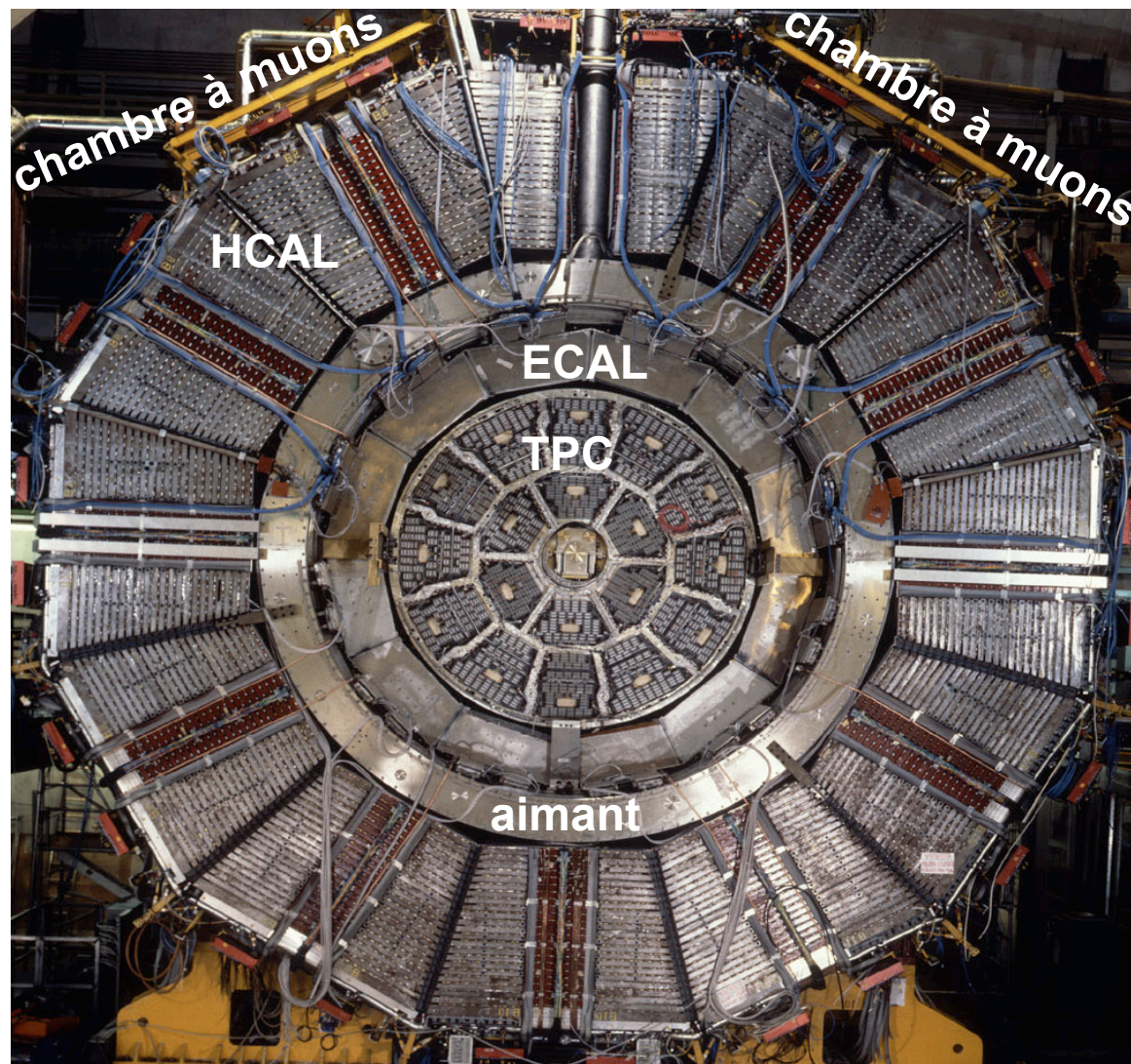
Les deux « bouchons »

- Calorimètres placés de part et d'autre de la partie centrale du détecteur



Détecteur ALEPH

- Partie centrale du détecteur, vue dans le plan transverse (perpendiculaire aux faisceaux)
 - les images qui suivent sont des vues similaires, reconstruites par ordinateur à partir d'événements réels enregistrés dans le détecteur



$$Z^0 \rightarrow e^+e^-$$

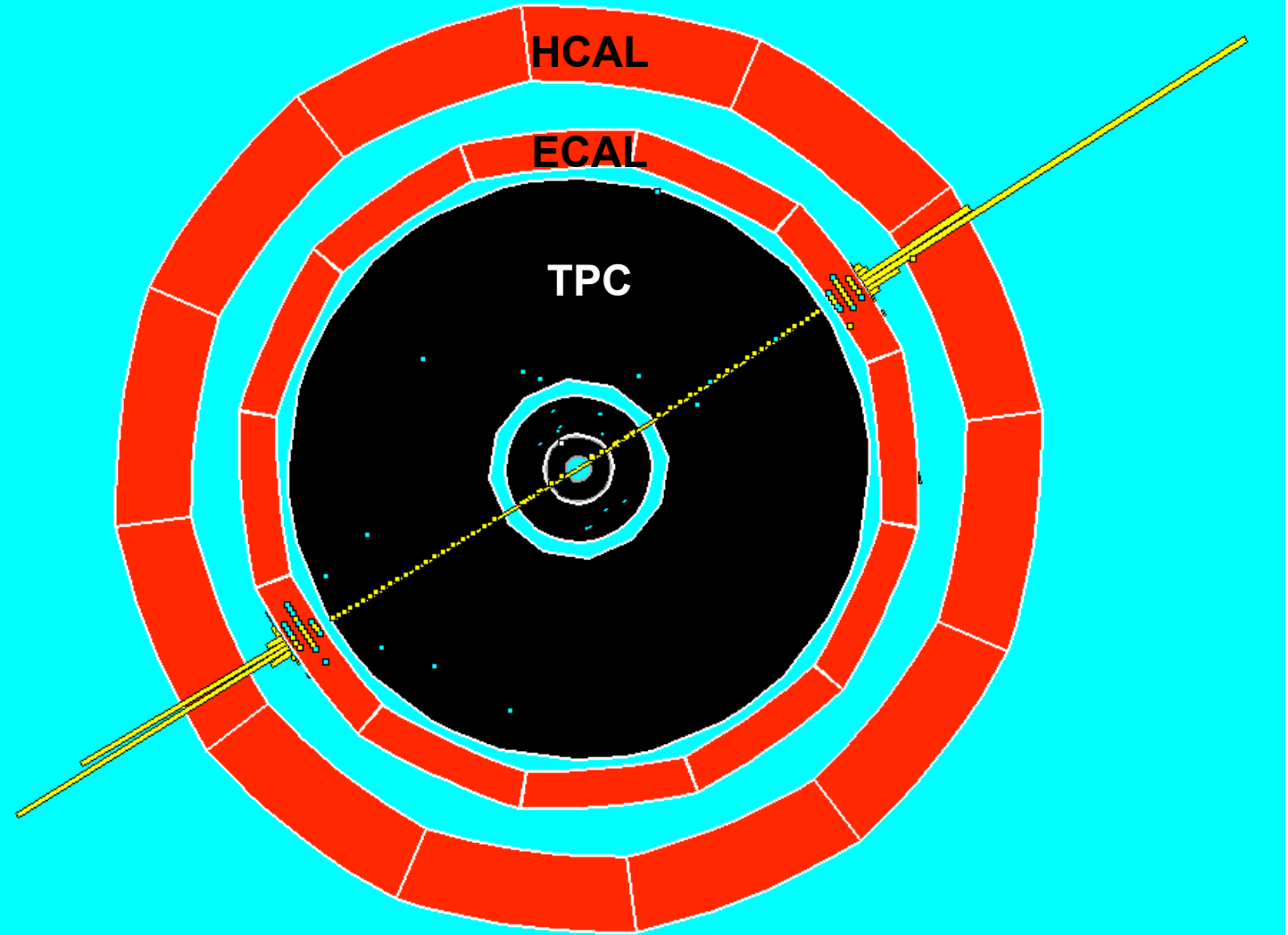
 ALEPH DALI

Run=15995 Evt=2012

**Désintégration d'un Z^0
(produit au repos au
centre du détecteur)
en électron et positon**

On voit deux traces
chargées dans la
TPC (courbure très
faible), partant dos-à-
dos par conservation
de la quantité de
mouvement totale.

On voit les dépôts
d'énergie dans
ECAL, typiques pour
des électrons.



$$Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

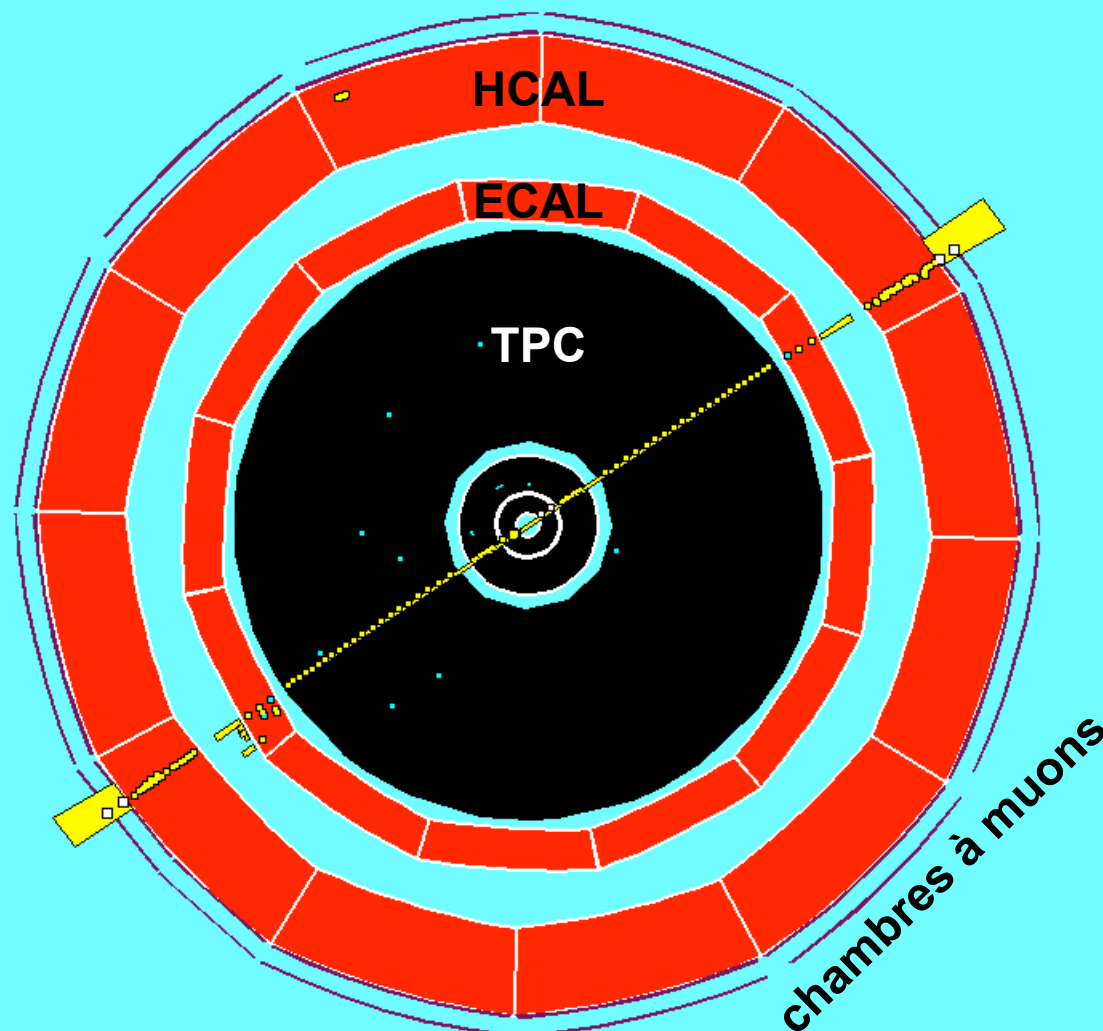
ALEPH DALI

Run=15995 Evt=835

**Désintégration d'un Z^0
(produit au repos au
centre du détecteur)
en paire de muons**

On voit à nouveau
deux traces
chargées dans la
TPC, dos-à-dos.

On voit très peu
d'énergie dans les
calorimètres, mais
des « touchés »
dans les chambres
à muons, typiques
pour des muons.



$$Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

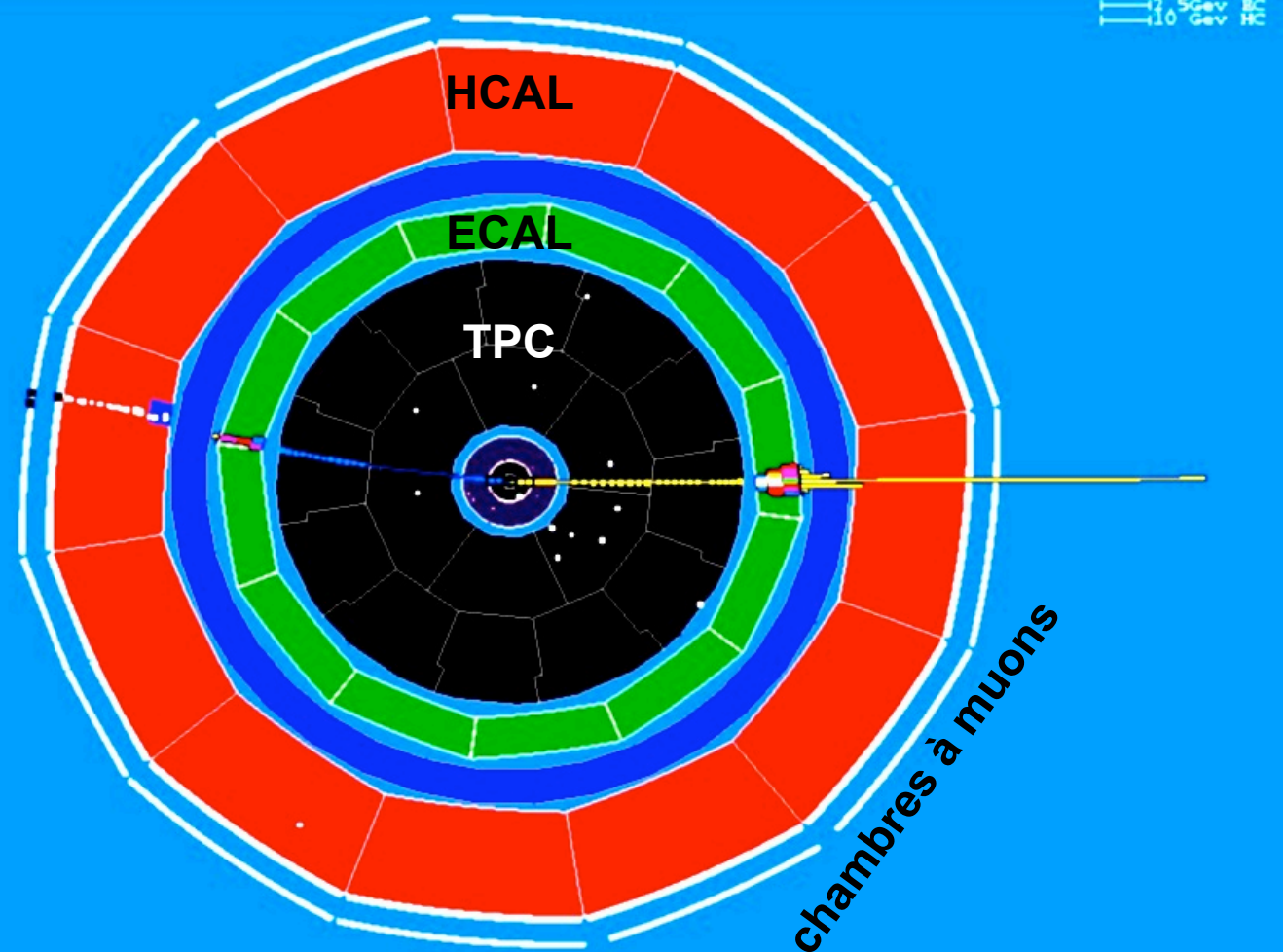
**Désintégration d'un Z^0
(produit au repos au
centre du détecteur)
en paire de tau**

On voit deux traces chargées dans la TPC, presque dos-à-dos, mais avec moins d'énergie qu'avant (courbure plus prononcée).

On reconnaît clairement un électron et un muon !

L'électron et le muon viennent des désintégrations $\tau \rightarrow e \nu \nu$ et $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$ (au centre du détecteur)

On en voit pas les neutrinos, qui ne sont pas détectés.

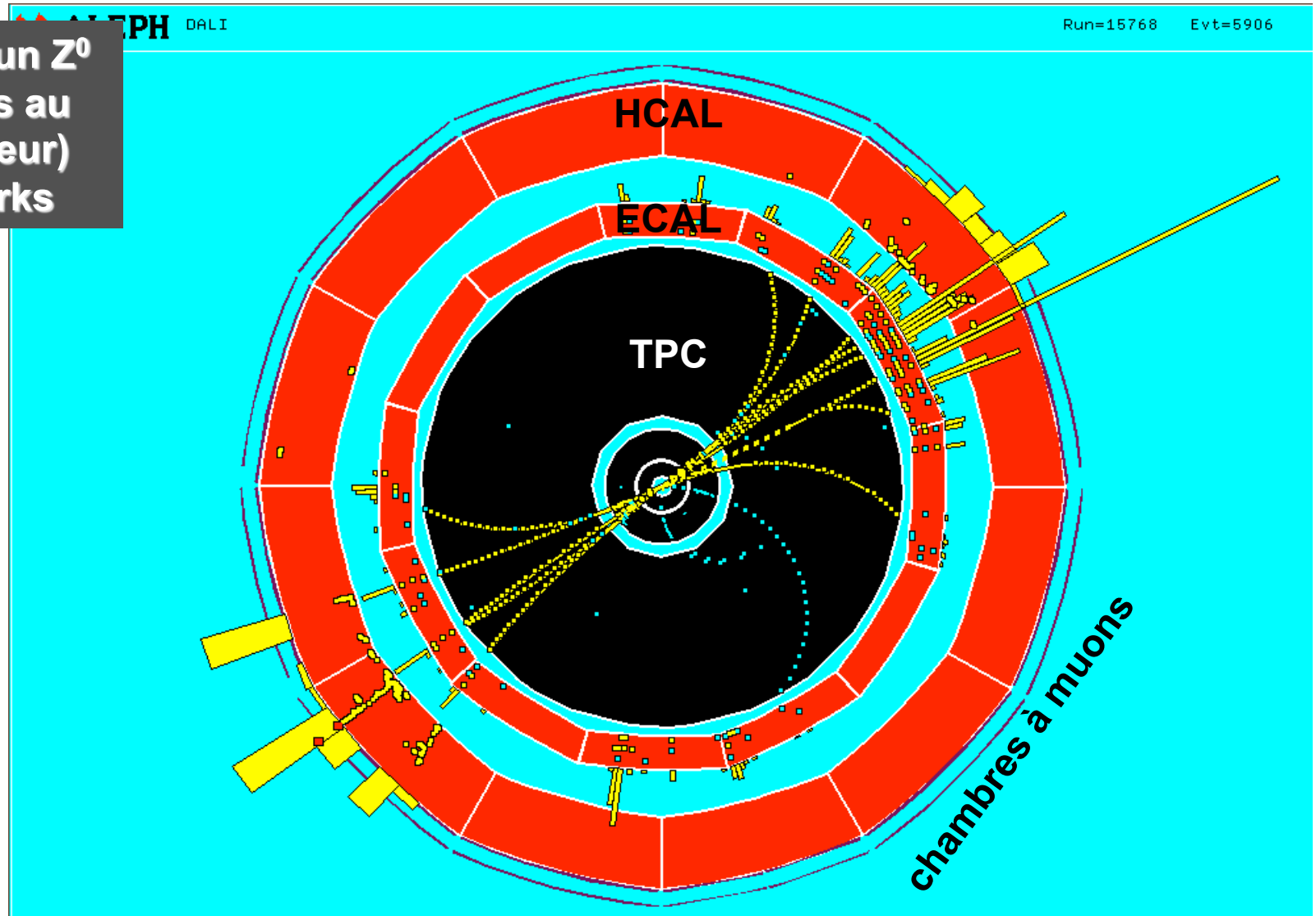


$$Z^0 \rightarrow q\bar{q} \text{ (2 jets)}$$

**Désintégration d'un Z^0
(produit au repos au
centre du détecteur)
en paire de quarks**

Les quarks sont émis dos-à-dos. Chaque quark donne lieu à un jet de particules (des hadrons formés de quarks) de moindre énergie.

Les particules chargées sont visibles dans la TPC. Les particules neutres et chargées déposent leur énergie dans les calorimètres. Il n'y a pas de muons.



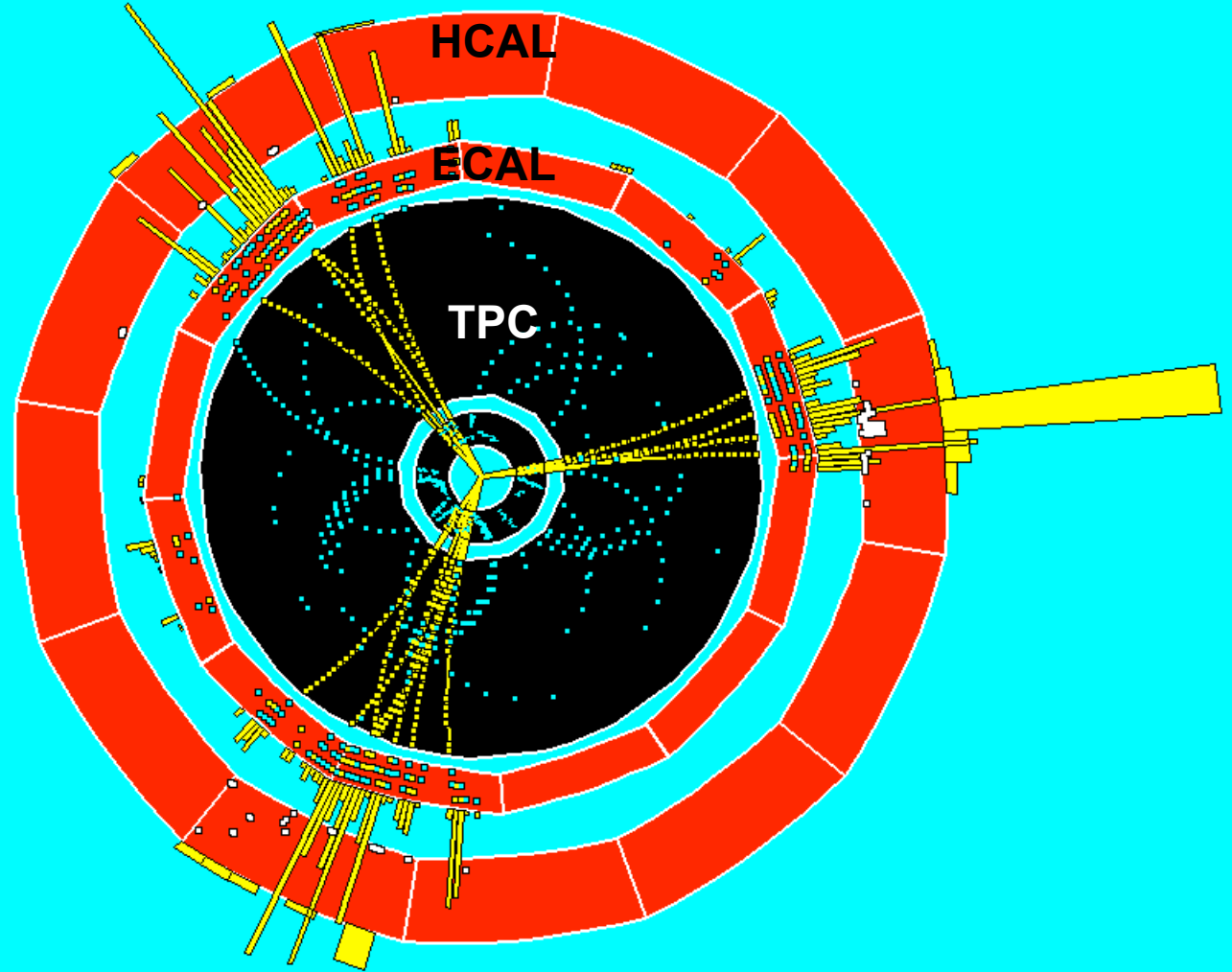
$$Z^0 \rightarrow q\bar{q}g \quad (3 \text{ jets})$$

Désintégration d'un Z^0
(produit au repos au
centre du détecteur)
en une paire de quarks
et un gluon

Le gluon « dur » est
irradié par l'un des
quarks.

Chaque quark ou
gluon donne lieu à un
jet de hadrons.

Par conservation, la
quantité de
mouvement
vectorielle totale des
deux quarks et du
gluon (donc des trois
jets) est nulle.

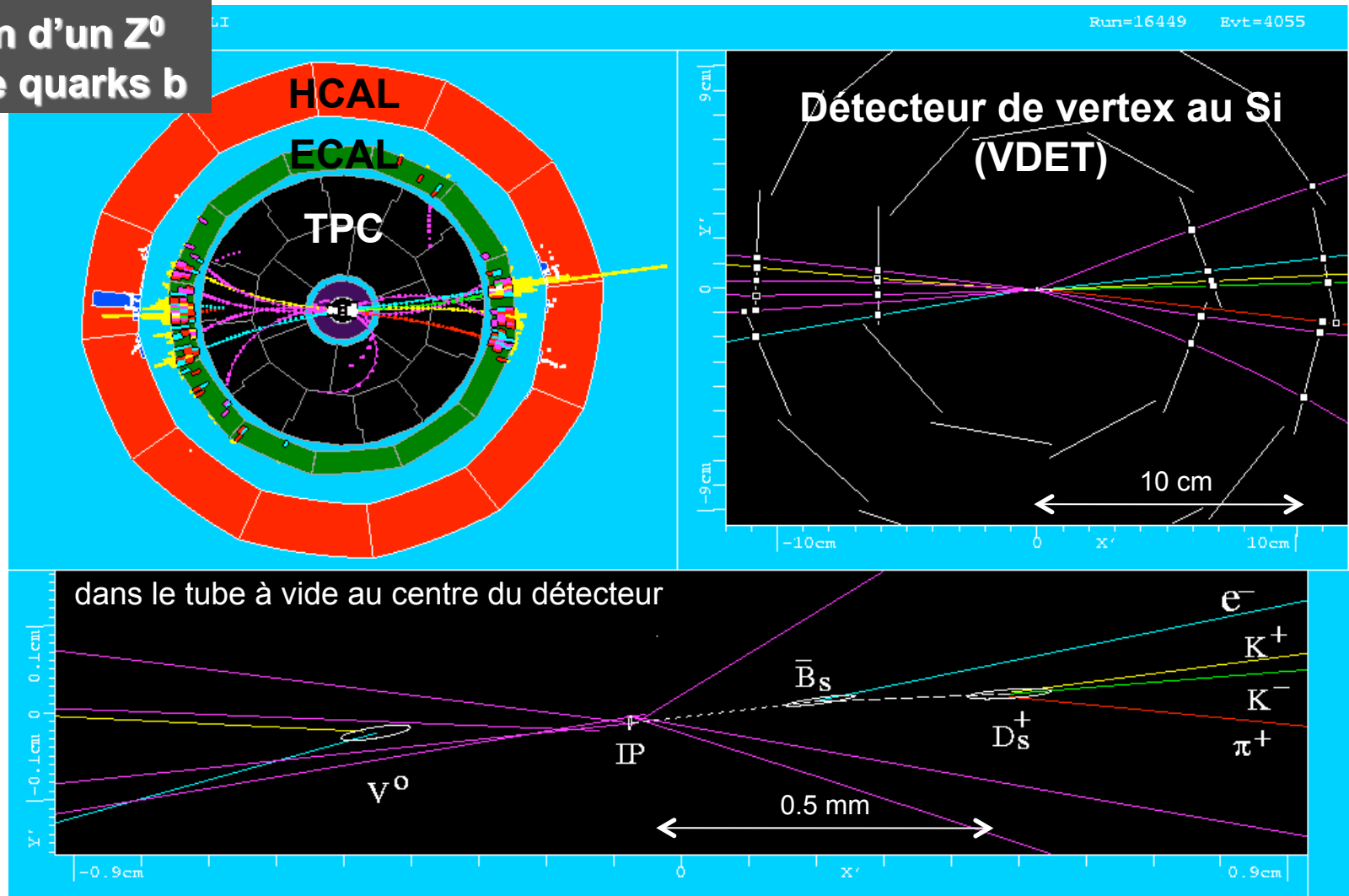


$$Z^0 \rightarrow b\bar{b}$$

Désintégration d'un Z^0 en une paire de quarks b

Chaque quark b
donne lieu à un jet
de hadrons.

Un de ces hadrons
(ici un \bar{B}_s dans le
jet de droite)
contient le quark b ;
il se désintègre
avec un temps de
vie moyen de 1 ps,
après avoir volé
sur une distance
de l'ordre du mm,
visible sur les
agrandissements
autour du point
d'interaction (IP).



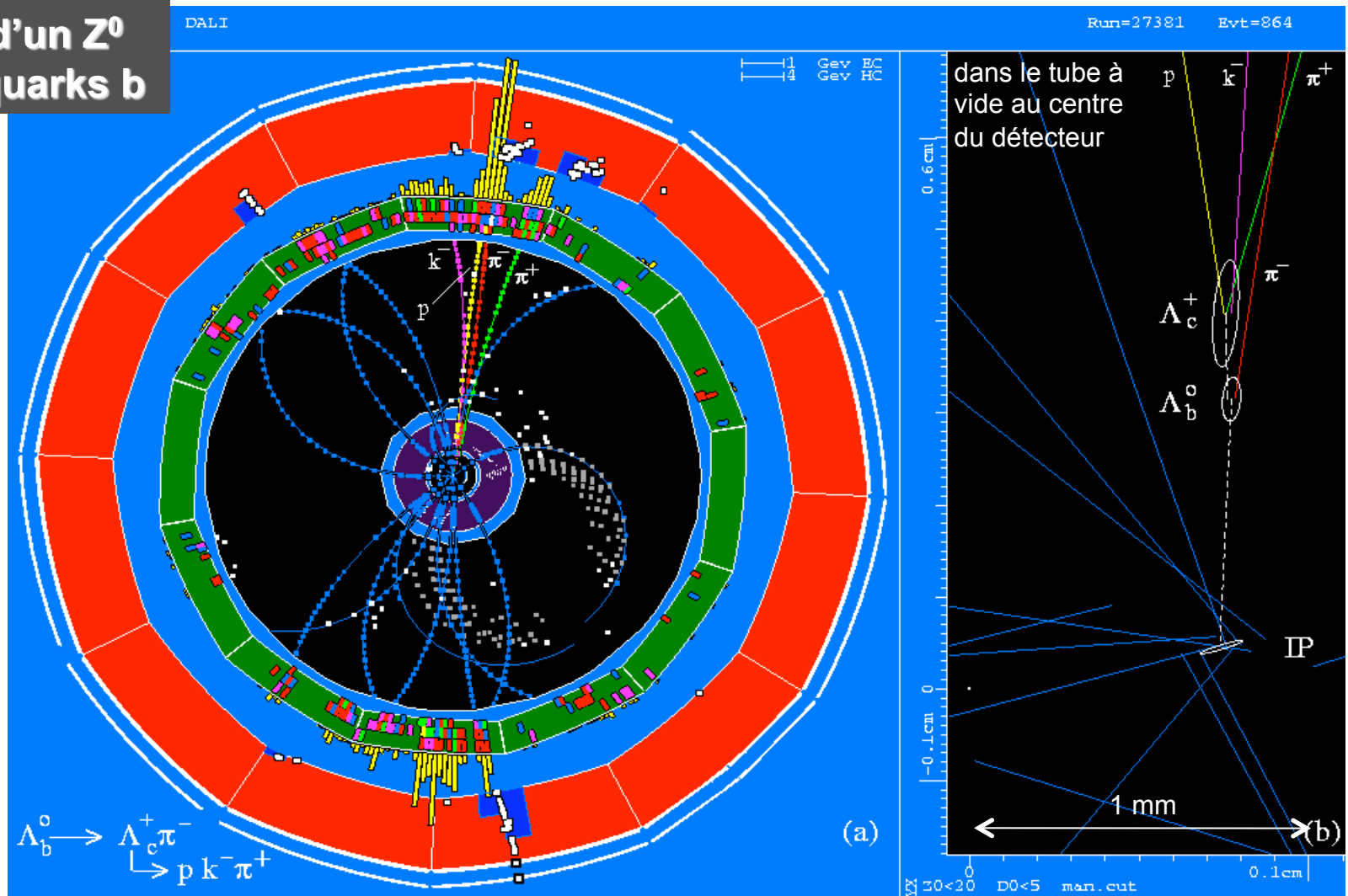
$$Z^0 \rightarrow b\bar{b}$$

Désintégration d'un Z^0 en une paire de quarks b

Chaque quark b
donne lieu à un jet
de hadrons.

Les particules
dessinées en
couleurs autres que
bleu sont utilisées
pour reconstruire la
désintégration d'un
baryon Λ_b , qui
contient un quark b
et deux quarks d.

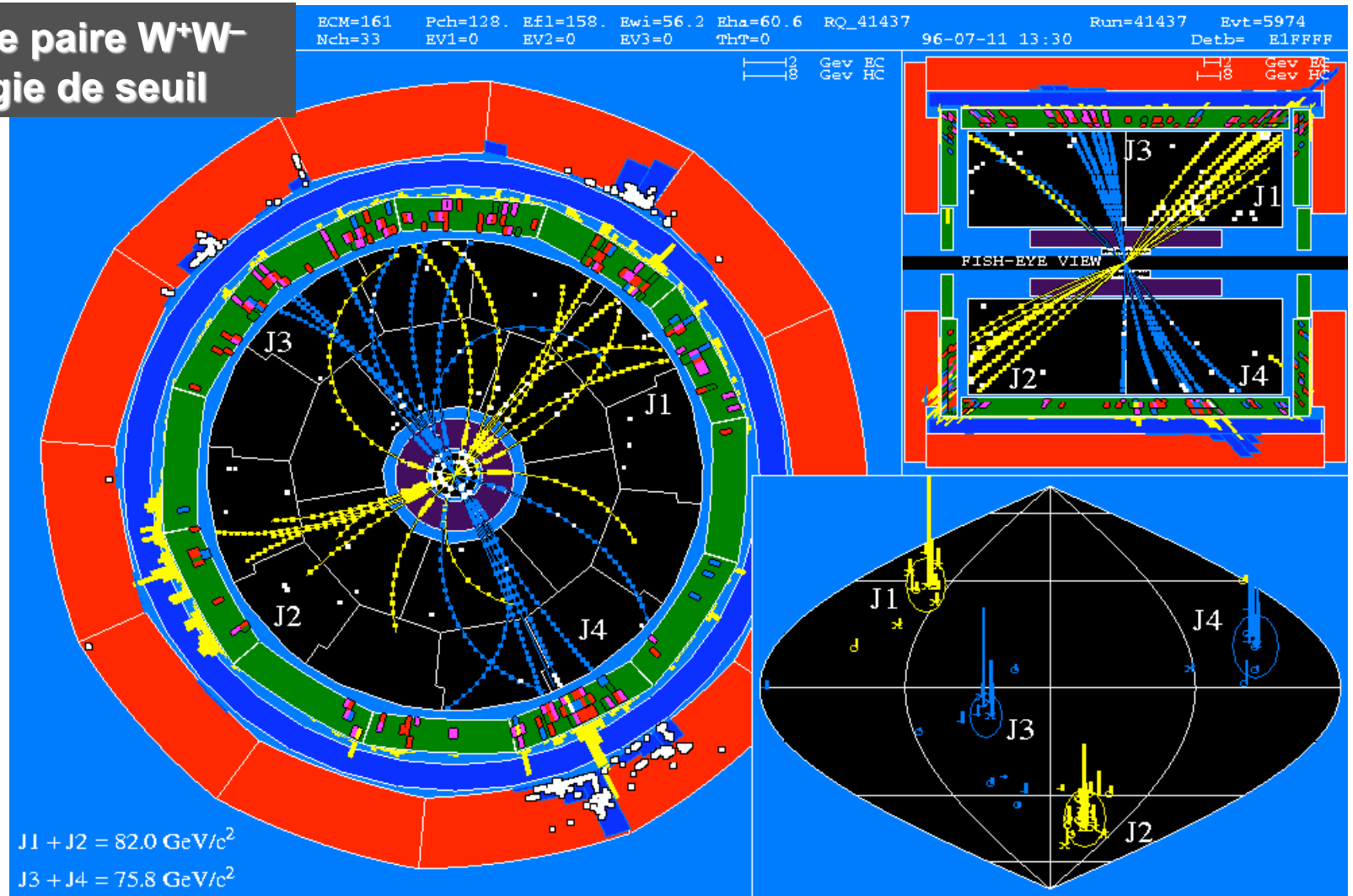
Le Λ_b , se désintègre
en $\Lambda_c \pi$, où le Λ_c
contient les quarks
c, u et d.



$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$

Production d'une paire W^+W^- près de l'énergie de seuil

Les deux W sont produits presque au repos. Ici chaque W se désintègre immédiatement en une paire de quarks, c'est-à-dire en deux jets (en bleu pour l'un des W , en jaune pour l'autre). Dans chaque désintégration les jets sont dos-à-dos.



$$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$$

Production d'une paire W^+W^- près de l'énergie de seuil

Ici le W^- se désintègre en une paire de quarks, donnant les deux jets dont les traces chargées sont dessinées en rouge et en bleu, et le W^+ se désintègre en un positon e^+ et un neutrino ν .

Le positon (trace dessinée en jaune) est identifié par son grand dépôt d'énergie dans ECAL.

Le neutrino n'est pas détecté. Cependant, comme c'est le seul neutrino de l'événement, son quadrivecteur énergie-impulsion peut être calculé sur la base des mesures de toutes les autres particules détectées, en sachant, par conservation, que le quadrivecteur total de l'événement vaut $(E_{e^+}+E_{e^-}, 0,0,0) = (\sqrt{s}, 0,0,0)$.

