

# Et pour cette physique quel détecteur?

Un détecteur qui,  
pour cette physique,  
dans le domaine d' énergie envisagé

collecte un maximum d' événements non biaisés

Il ne s' agit  
ni d' n détecteur LEP  
ni d' n détecteur LHC

# Plan

La finalité d'un tel détecteur  
et les contraintes de la physique

précision, efficacité, herméticité  
distributions angulaires,  
spectres en énergie,  
performances nécessaires

Mesure des chargés

Mesure des neutres

Les contraintes de la machine

bruit de fond,  
timing

Les degrés de liberté

le choix du design  
y en a-t-il vraiment un?

Les technologies

des différents éléments  
scintillateur, silicium, gaz

Les performances?

## Finalité et contraintes physique

Les fonctions:

Mesurer  
Identifier

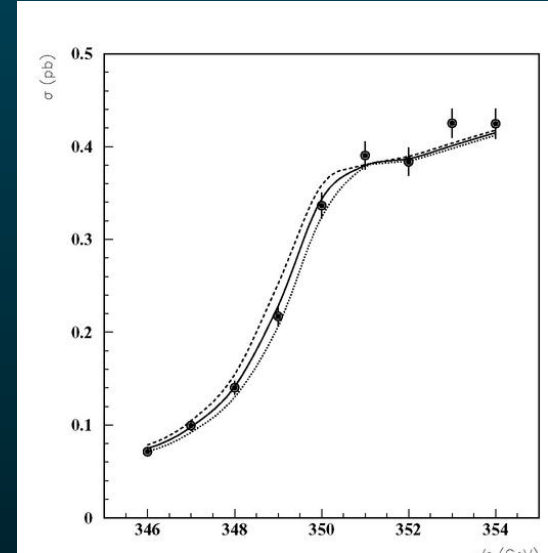
QUOI?

Finalité et contraintes physique

Cela dépend!

seuil du top, mesurer la section efficace  $t\bar{t}$

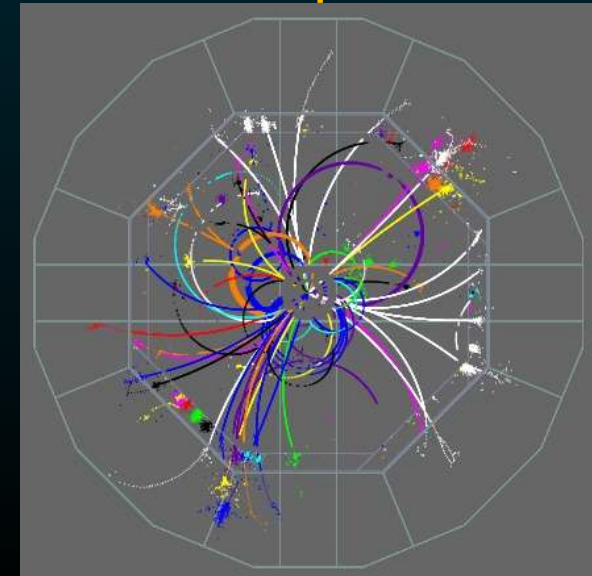
identifier le système  $t\bar{t}$   
 veux-je identifier chaque  $t$ ?  
 mesurer l'asymétrie  $t\bar{t}$  ??



$t\bar{t}$  pour étudier les rapports d'embranchement du top

identifier un top où est-il?

étudier l'ordre dans le détail de sa désintégration



## Finalité et contraintes physique

Cela dépend!

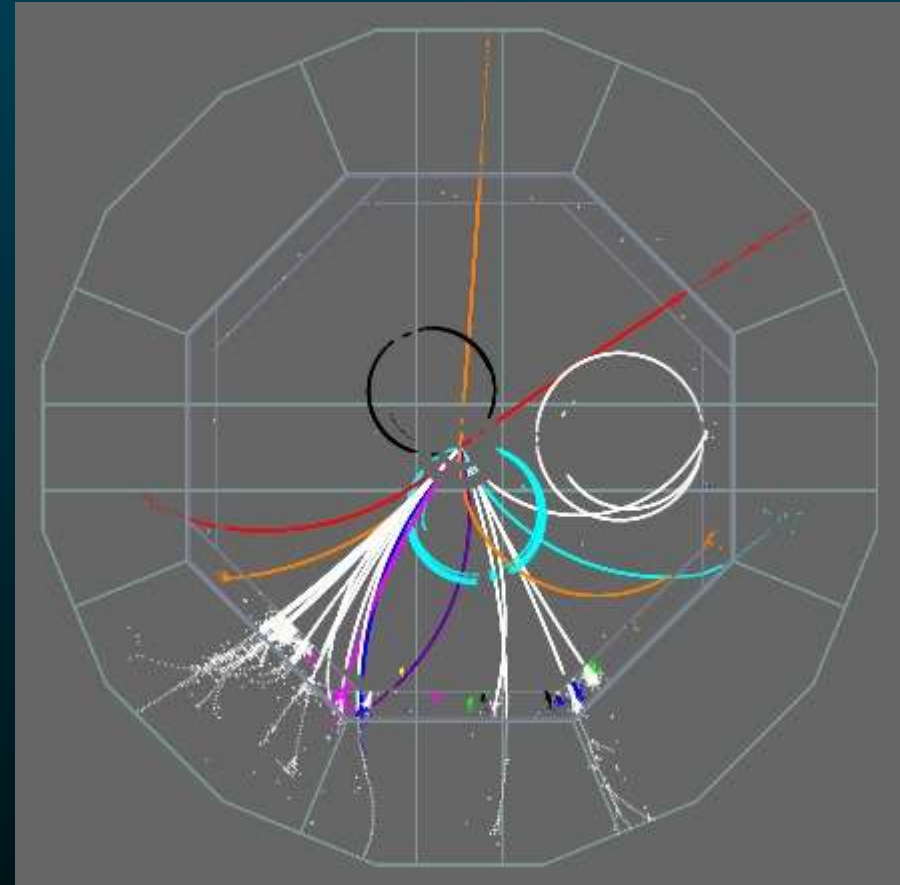
Étude du Higgs

via ZH

masse de recul au Z ?

précision sur la masse  $\mu\mu$  $\Rightarrow$  précision sur les impulsionsprécision sur  $E_{CM}$  $\Rightarrow$  beamstrahlung

identification du Z, signature du H,  
rapports d'embranchement  
compréhension des b, des  $\tau$ , des W



## Finalité et contraintes physique

La plupart de la physique envisagée nécessite de voir les W, les Z, les H.

Nous ne désirons pas voir le contenu des W ou Z  
(sauf à vouloir mesurer plus précisément leurs désintégrations)  
mais nous voulons les identifier et les mesurer  
dans tous leurs modes

Nous voulons connaître en détail le contenu des H

## Finalité et contraintes physique

Les fonctions de notre détecteur sont donc:

Mesurer  
Identifier

les leptons

primaires,

de désintégration de Z, W, H

et de saveurs lourdes

ils sont une signature  
de la présence de leptons neutres

les hadrons primaires

ou issus de désintégration de Z, W, H

signant ceux qui sont issus de quarks lourds, b et c, et légers

les photons, primaires ou provenant de  $\pi^0$ .

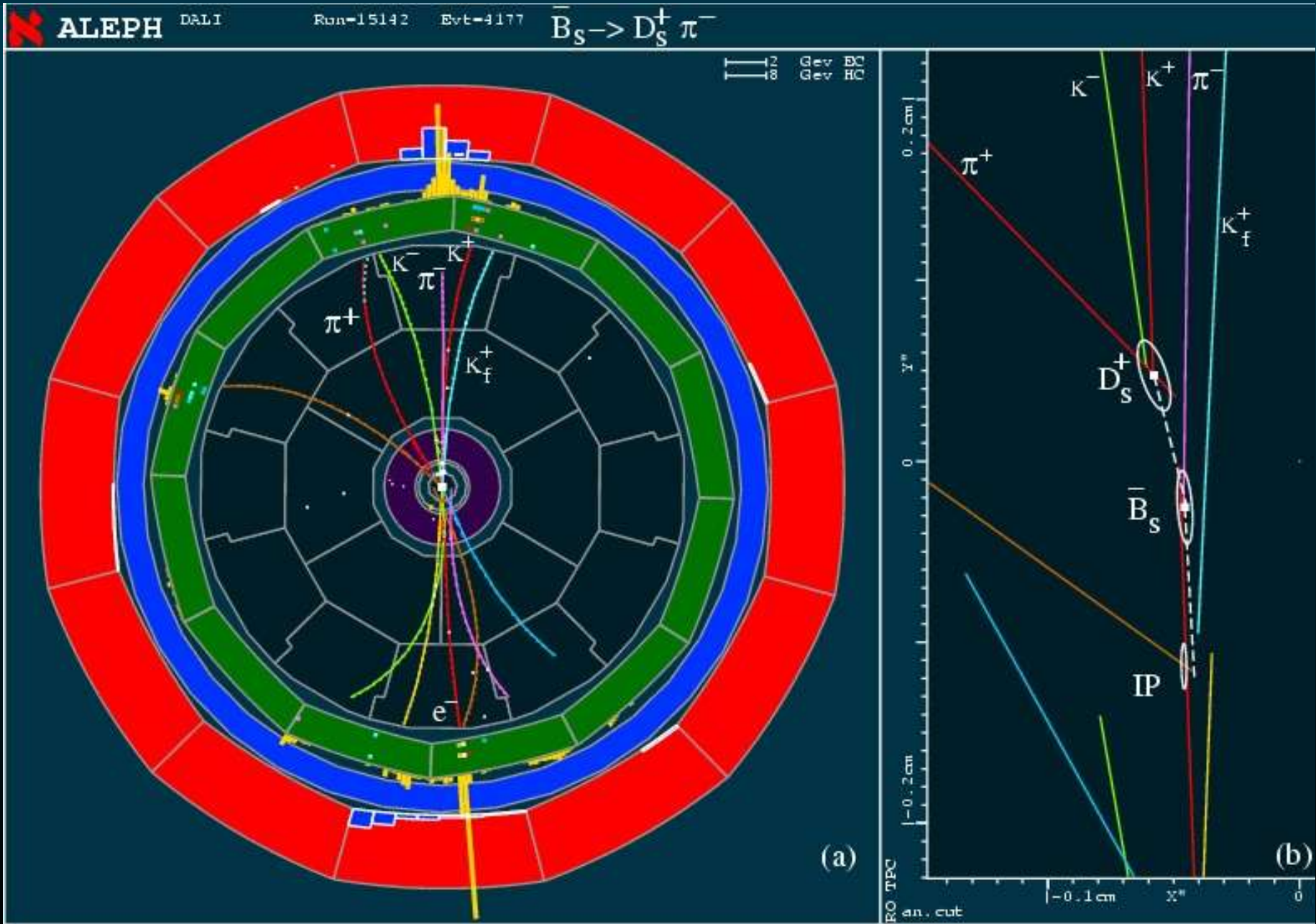
## Finalité et contraintes physique

Les hadrons d'intérêt pour nous se désintègrent avec un temps de vie caractéristique selon qu'ils proviennent de  $b$ ,  $c$  ou  $s$ : ils sont signés d'abord par leur longueur de vol, leur masse, leur contenu.

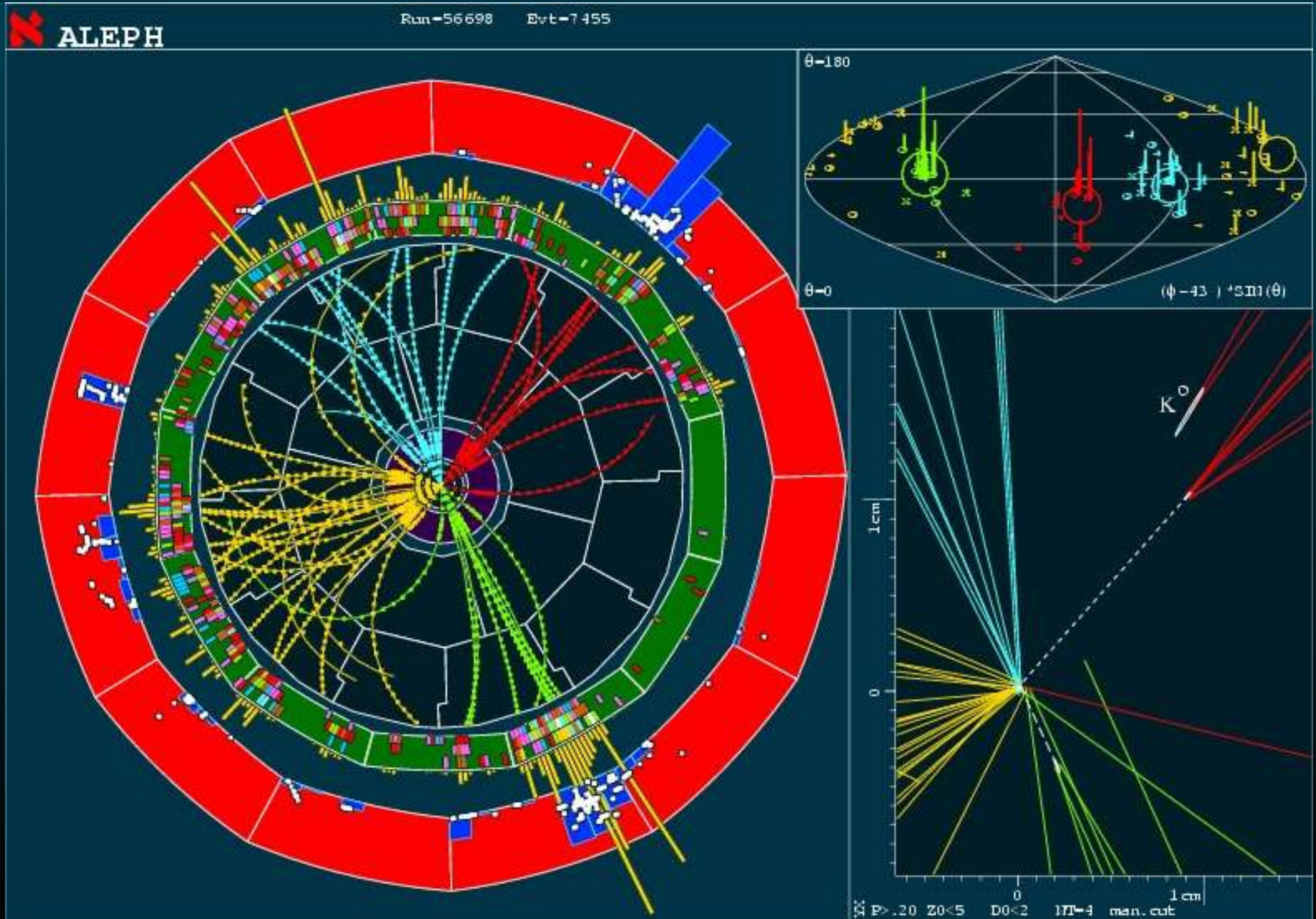
Sommes-nous intéressés au jet d'un quark?  
ou simplement à l'identification de ce quark  
et à la reconstruction du quadrivecteur d'un quark



# Finalité et contraintes physique

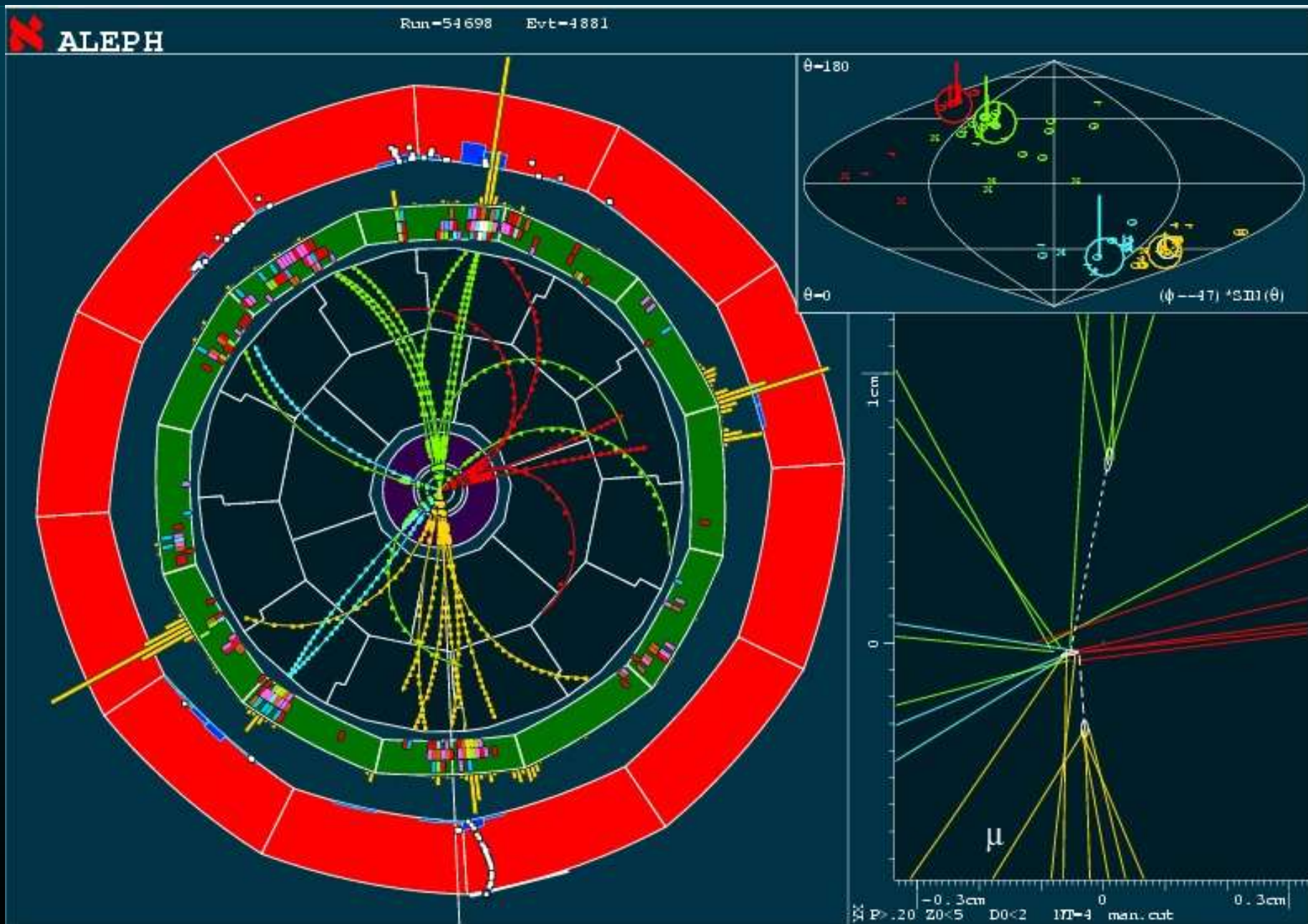


# Finalité et contraintes physique





# Finalité et contraintes physique



## Finalité et contraintes physique

Les leptons "visibles" sont chargés  $\Rightarrow$  mesure des charges

Les désintégrations de hadrons contiennent majoritairement des charges (60%)

mais aussi des photons venant de  $\pi^0$  (30%)

et un certain nombre de hadrons neutres à vie longue ( $K^0$ ,  $n$ )

les fractions de ces composantes étant extrêmement fluctuantes

On peut envisager de mesurer ces hadrons globalement,

d' autres l'ont fait,

ou de mesurer indépendamment leurs ingrédients

Mais pour mesurer une charge ou même un muon un champ magnétique nous est nécessaire

## Mesure des chargés

mesure de l'impulsion

assurer la précision des points mesurés  
ne pas perturber les trajectoires, matière

mesure du paramètre d'impact

mesure du  $dE/dx$

Ce qui définit le niveau de performance

# Mouvement d'une particule dans un champ magnétique

$$P^\mu = m U^\mu = m \gamma (c, \mathbf{v})$$

$$\frac{dP^\mu}{d\tau} = q F^{\mu\nu} U_\nu$$

pour un champ électrique nul la partie spatiale s'écrit

$$m \gamma \frac{d\mathbf{v}}{d\tau} = m \gamma^2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q \gamma (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})$$

Décrivons en complexes le mouvement dans le plan orthogonal à B

$$\frac{dv}{dt} = -i \frac{qB}{m \gamma} v \quad \text{posons} \quad \omega = \frac{qB}{m \gamma}$$

$$\frac{dv}{v} = -i \omega dt$$

$$v = v_0 e^{-i\omega t}$$

$$x = x_0 + i \frac{v_0}{\omega} e^{-i\omega t}$$

La trajectoire est un cercle de rayon

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{m \gamma v}{qB} = \frac{p}{qB}$$

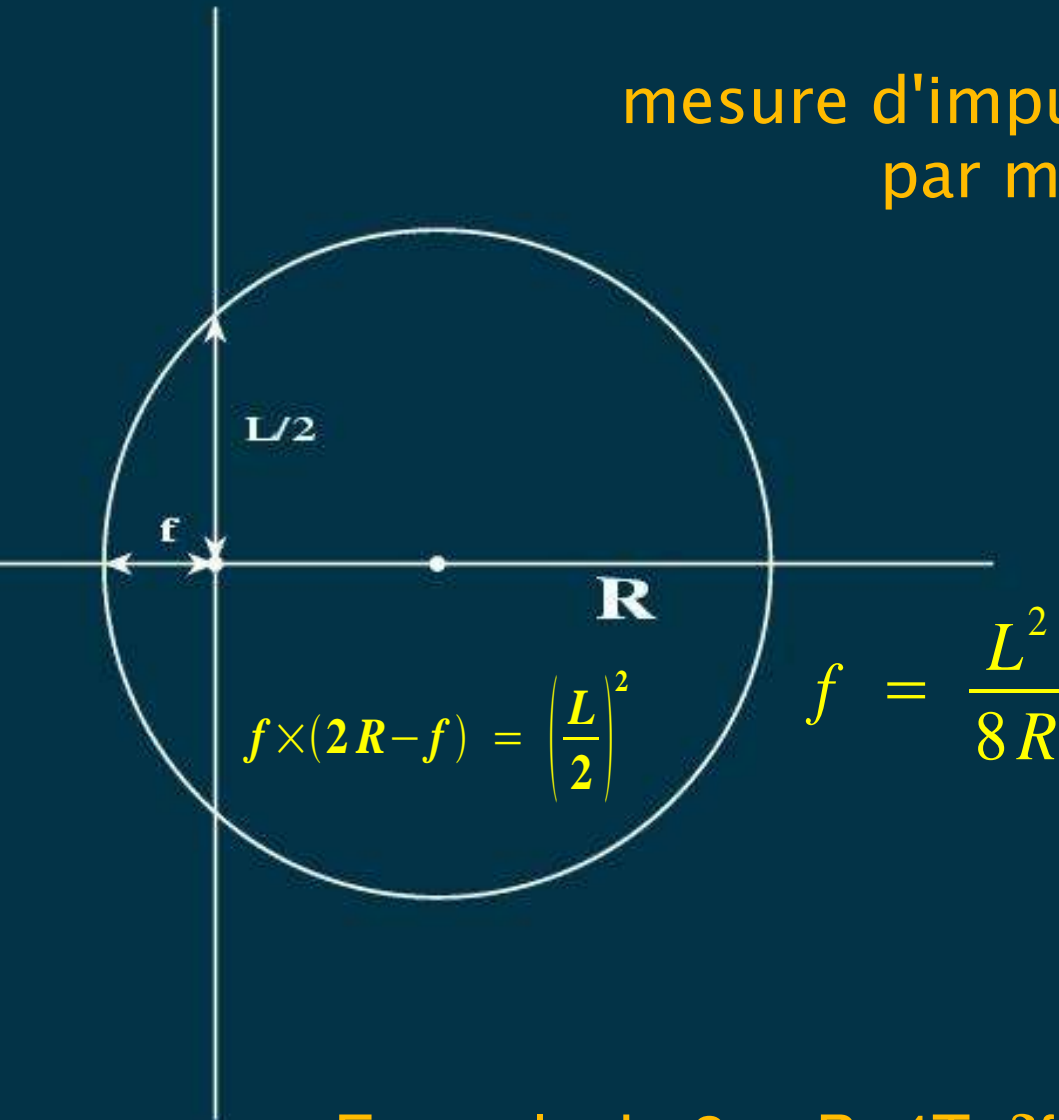
$$p_{\text{perp}} = q R B$$

en SI, p est en VC/c, qRB en CmT

si la charge est en électrons: p (eV) = c R(m) B(T)

$$p(\text{GeV}) = 0,3 B(\text{T}) R(\text{m})$$

mesure d'impulsion dans un champ magnétique par mesure de la flèche de la trajectoire



$$p_{perp} = 0,3 B R \quad \text{en GeV T m}$$

$$\frac{\delta p}{p^2} = \delta f \frac{8}{0,3 B L^2}$$

à longueur constante,  
 $\delta f$  pour  $f$  petit est une constante,  
 nombre de points,  
 précision du point

Exemple:  $L=2\text{m}$ ,  $B=4\text{T}$ ,  $\delta f = 10^{-4} \text{ m}$ ,  $\delta p/p^2 = 0,4 \cdot 10^{-4}$   
 le % sur des  $\mu$  de 250 GeV

# Dépendance angulaire

une trace d'impulsion  $p$  et d'angle polaire  $\theta$

$$p_t = p \sin\theta \quad dp_t = a p_t^2 \quad a \sim L^{-2}$$

$$dp = dp_t / \sin\theta$$

$$\text{soit } x = \cos\theta$$

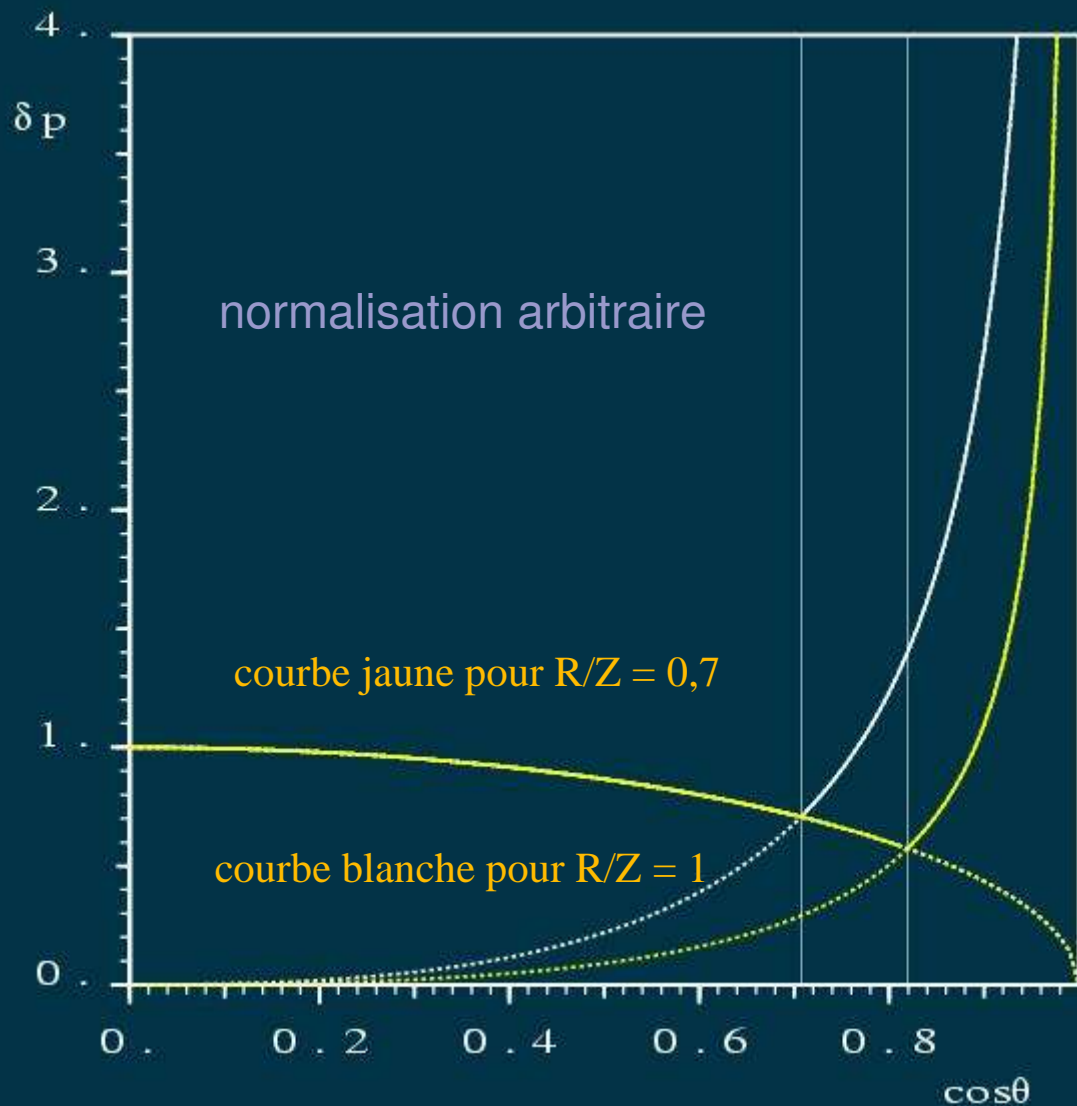
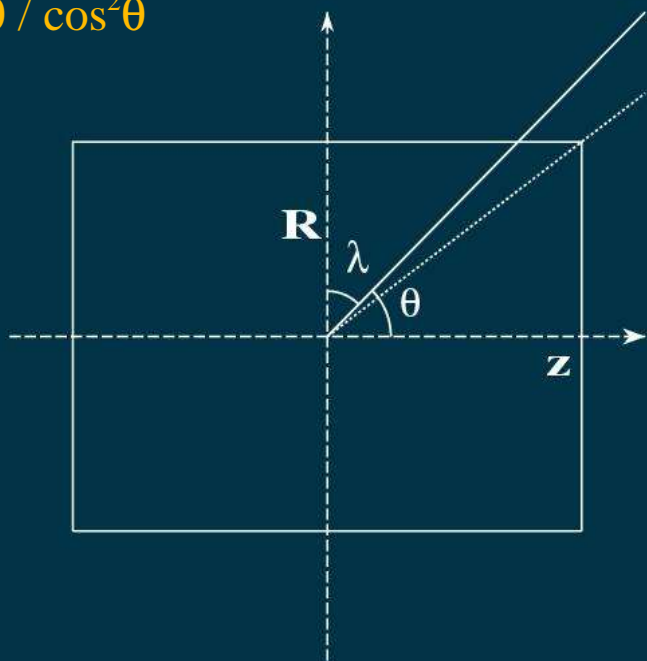
$$dp \sim L^{-2} p^2 \sin^2\theta / \sin\theta = L^{-2} p^2 (1-x^2)^{1/2}$$

Baril  $L = R$

$$dp = R^{-2} p^2 (1-x^2)^{1/2}$$

Bouchon  $L = Z \operatorname{tg}\theta$   $\delta p = p^2 / (1-x^2)^{3/2} / x^2$

$$dp \sim Z^2 p^2 \sin^3\theta / \cos^2\theta$$



function 1. x q-  
function 1. x q- -1.5 \*\* x 2.5 \*\*\* R/Z 2.5 \*\*\*

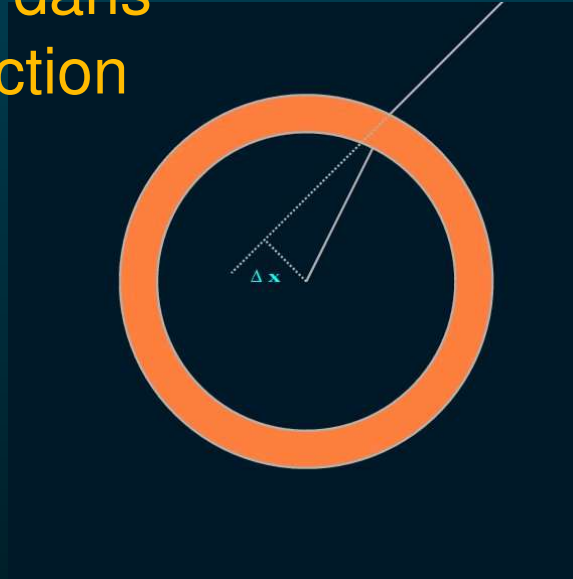


## Paramètre d' impact

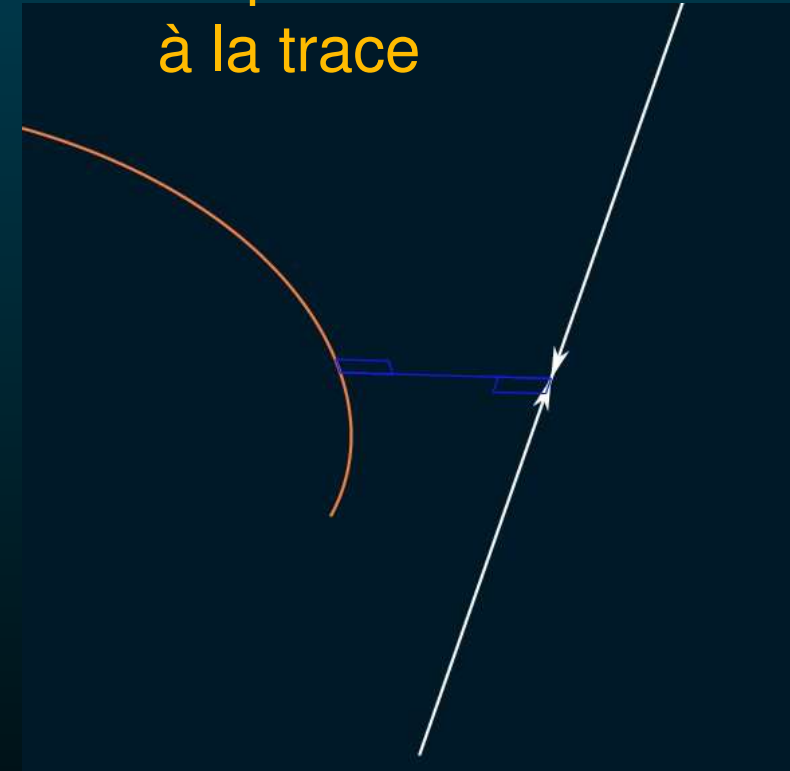
Diffusion multiple dans l'élément de détection

$$\theta = \frac{13,6}{p \beta} \sqrt{t}$$

où l' épaisseur t est en longueur de radiation et p en MeV



Plus courte distance du point d'interaction à la trace



à une distance r l'erreur sur le paramètre d' impact d est

$$\delta d = r \frac{13,6}{p \beta} \sqrt{t}$$

être le plus précis possible, au plus près

et le plus "transparent" possible

## Electrons

Leur mesure

$$\frac{\delta p}{p} = \alpha p$$

Chargé, donc impulsion mesurable par trajectoire dans B  
électromagnétique, donc énergie mesurable dans calorimètre

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{\alpha'}{\sqrt{E}}$$

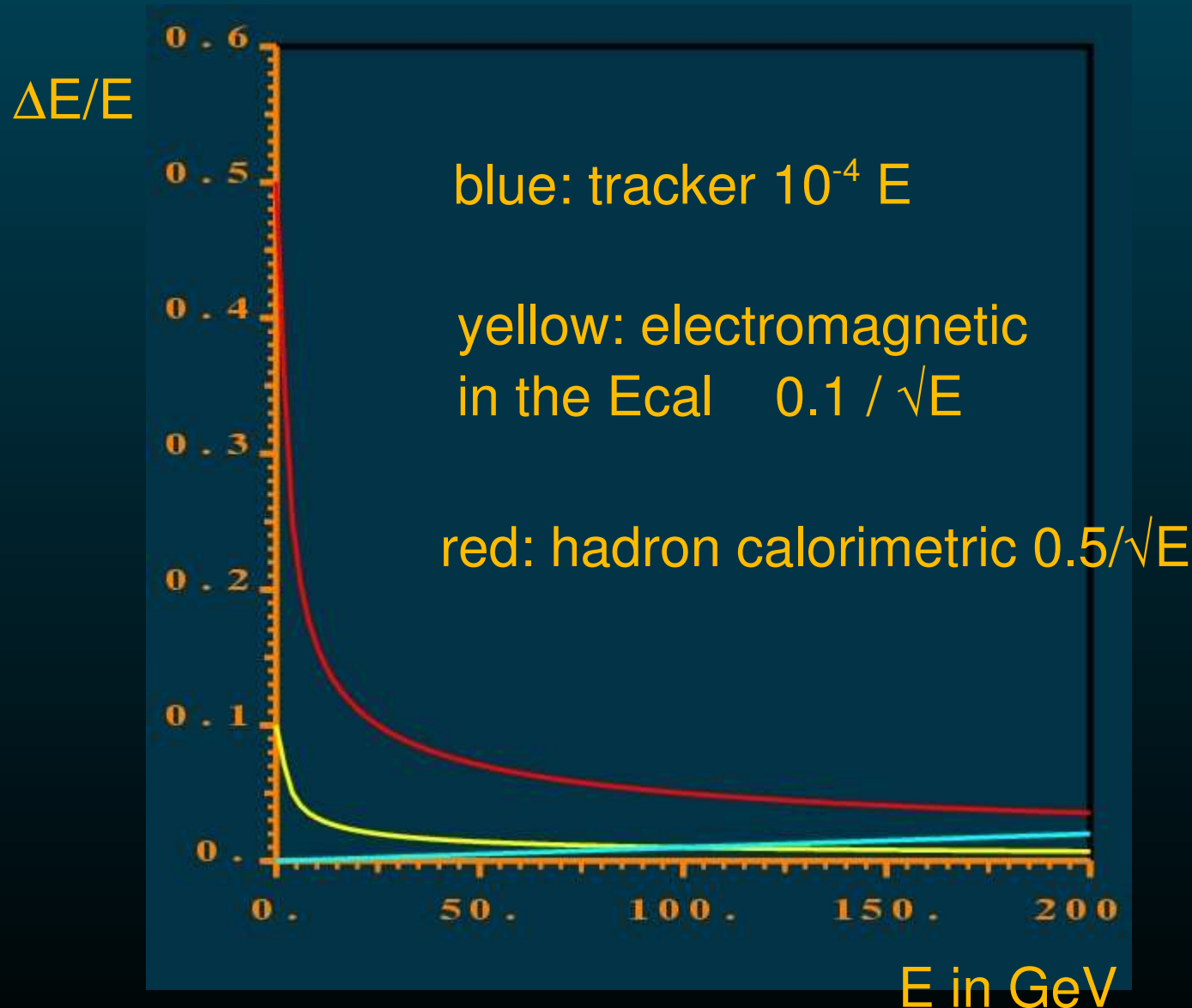
Valeurs typiques :  $\alpha = 10^{-4}$ ,  $\alpha' = 10^{-1}$   
pour des impulsions et énergies en GeV

L'énergie est mieux mesurée que l'impulsion  
à partir de 100 GeV

Difficultés:

ils émettent des photons de bremsstrahlung (mesure d'énergie)  
et génèrent des rayons  $\delta$  (mesure de la trajectoire)

# Resolution figures



In the domain of interest the tracker is always better.

Only at very high energies does the Ecal compete for electrons

## Electrons

### Leur identification

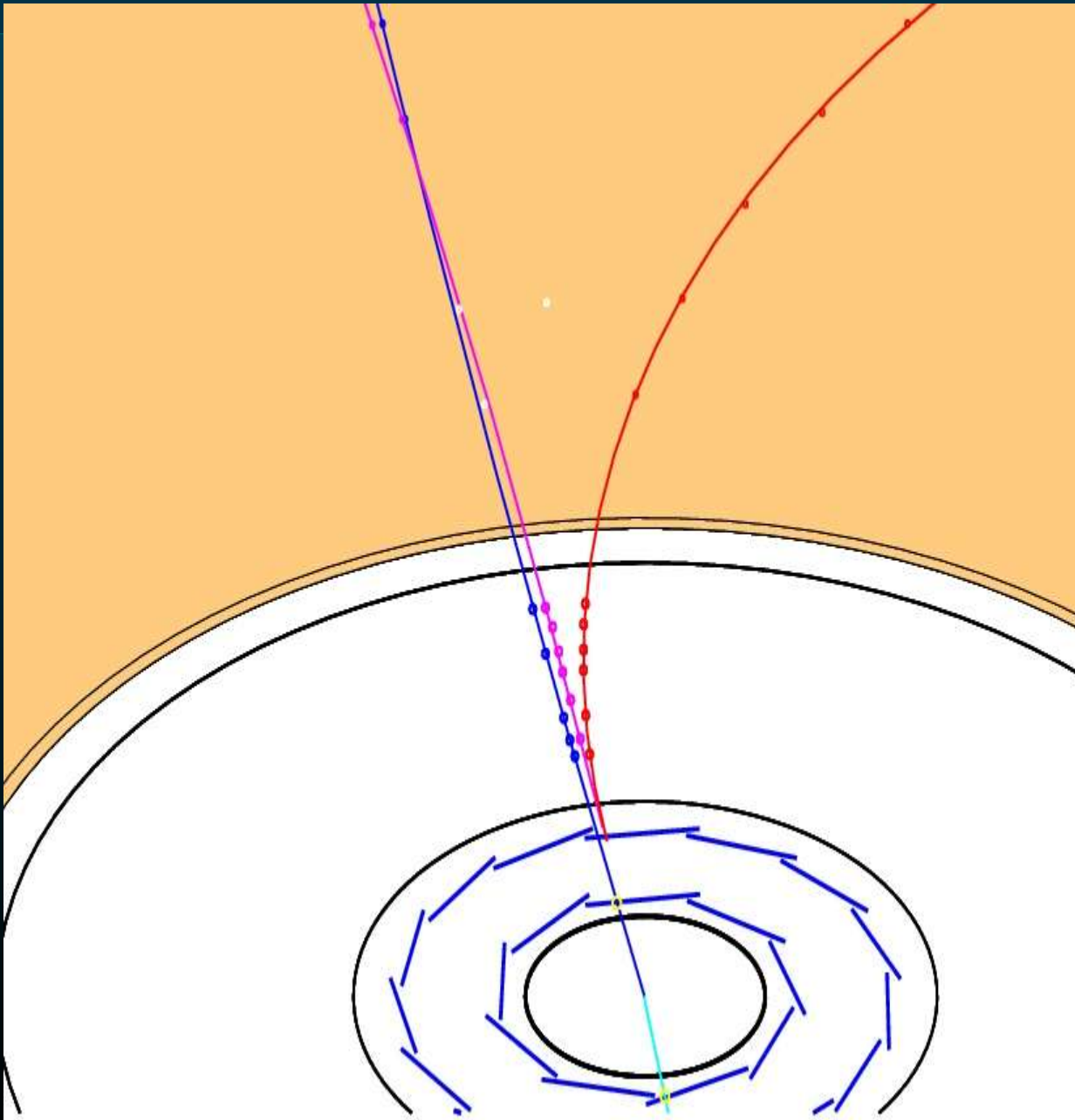
$E/p$

forme de la gerbe

$dE/dx$

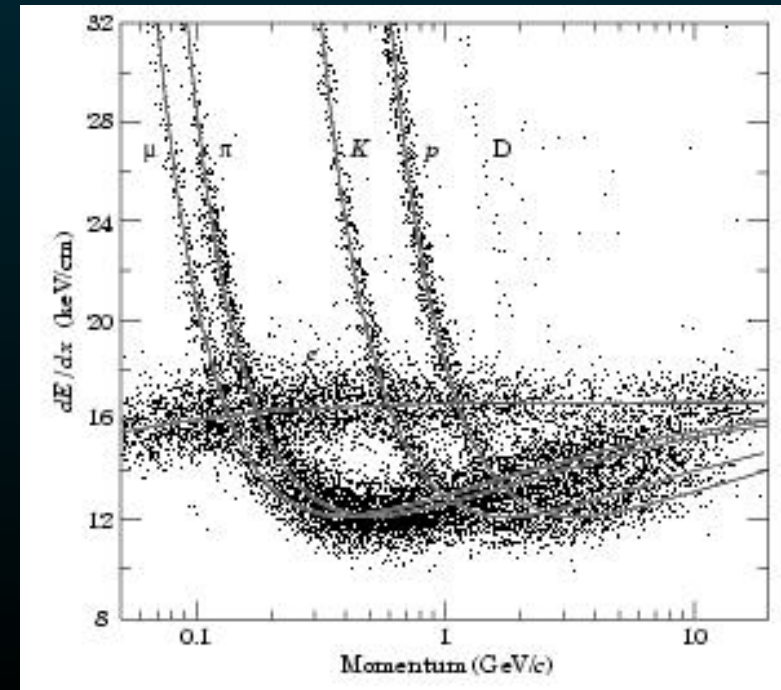
détecteurs spécifiques: Cerenkov, radiation de transition

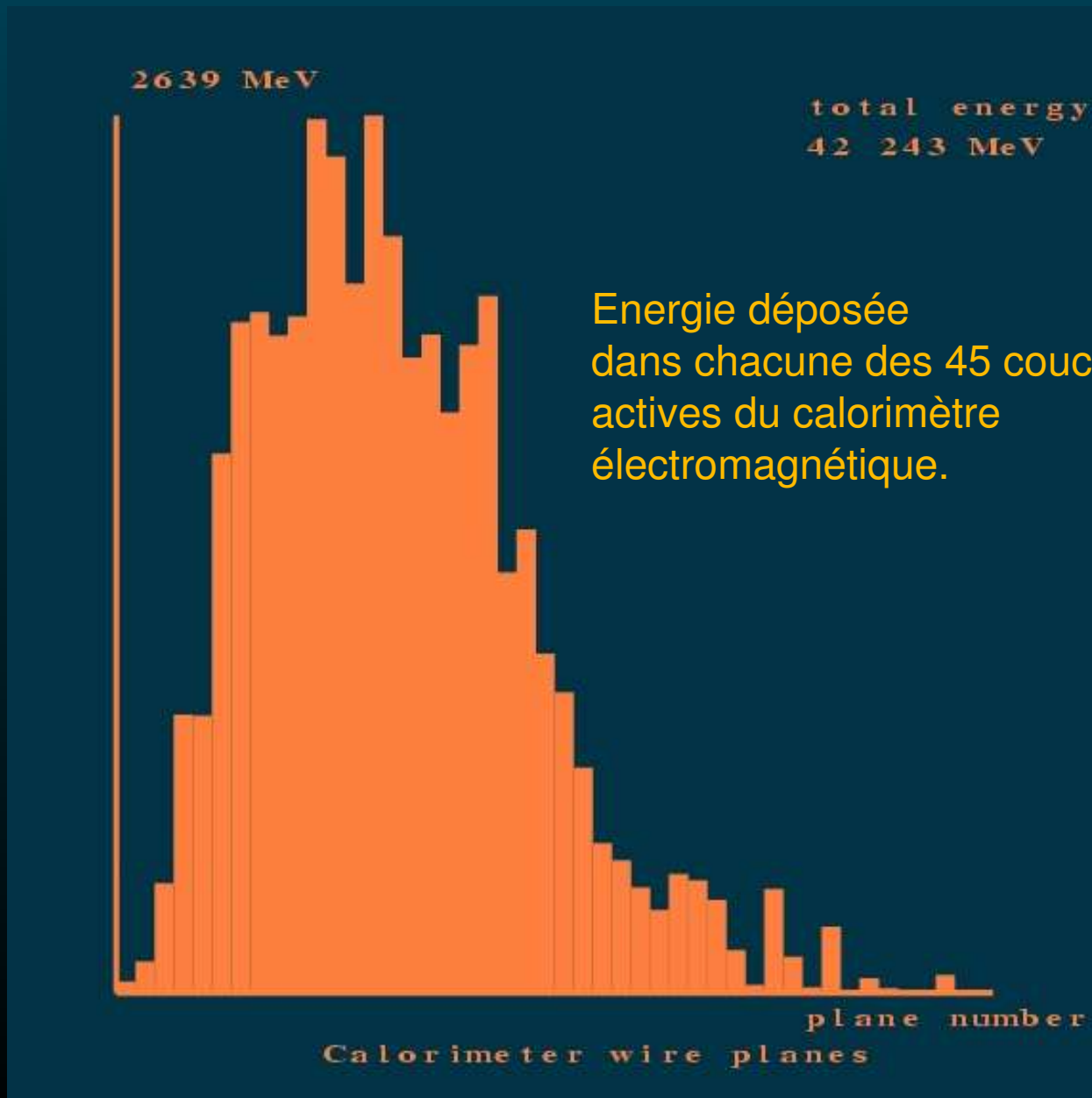
est-ce un électron "prompt" ou une conversion de  $\gamma$   
paramètre d'impact?



Conversion  
d'un photon  
sur le  
détecteur  
de vertex.  
ALEPH

$dE/dx$

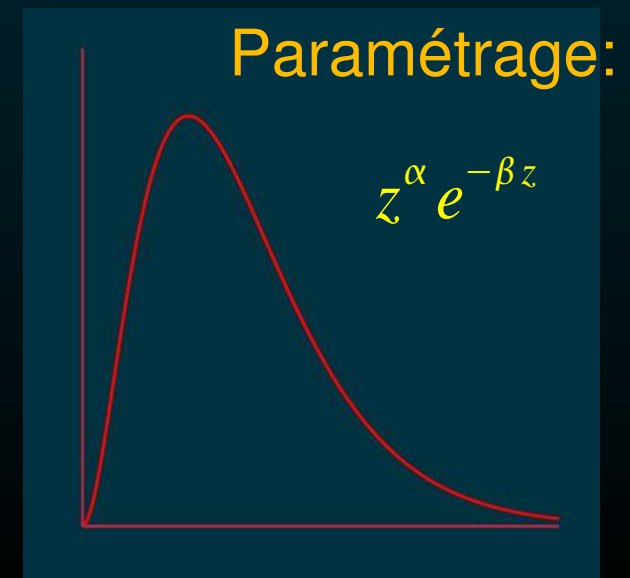




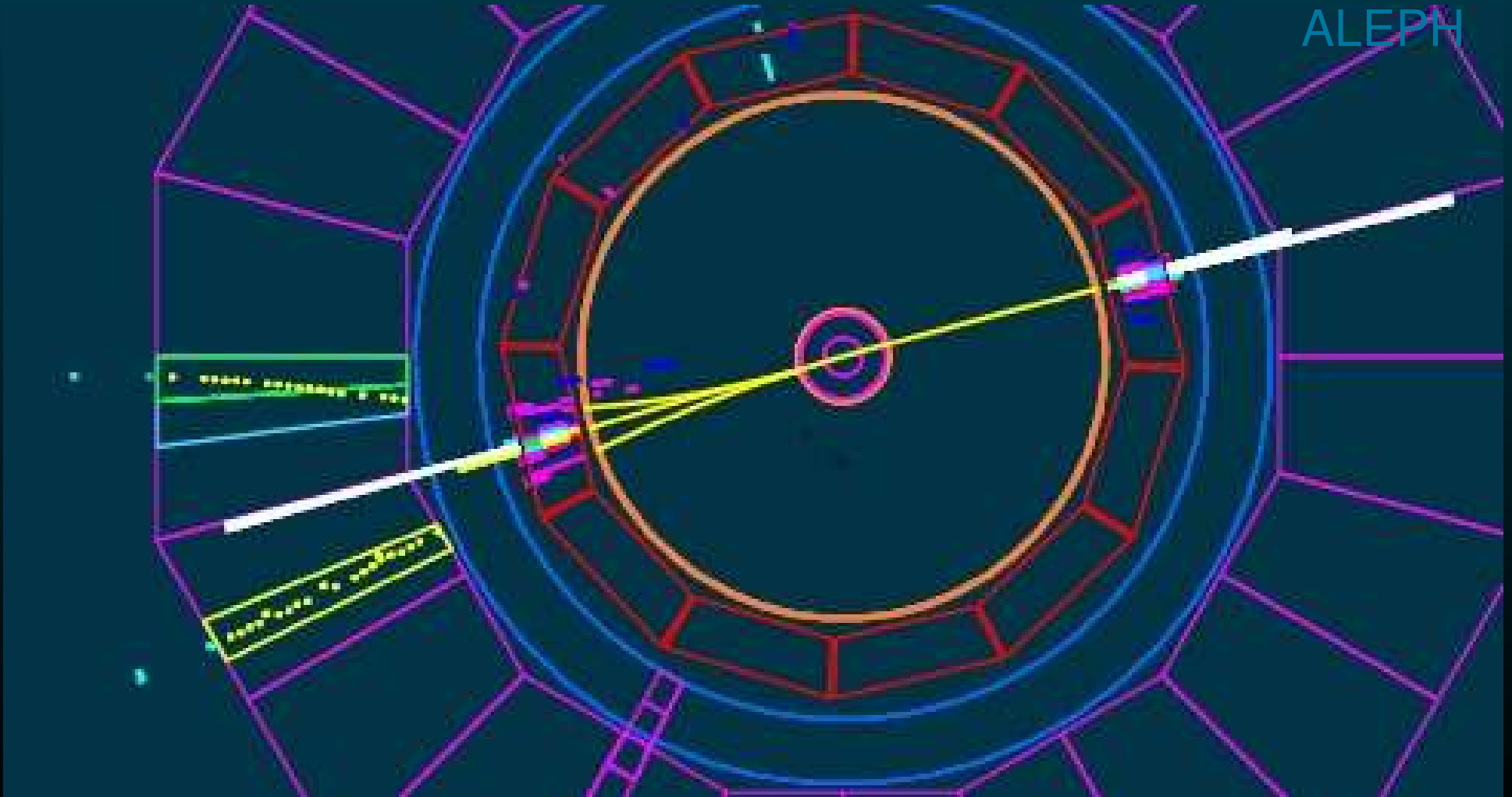
## ALEPH

Un électron de 45 GEV

Profil en profondeur de l' énergie déposée par un électron de 45 GeV.



$$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

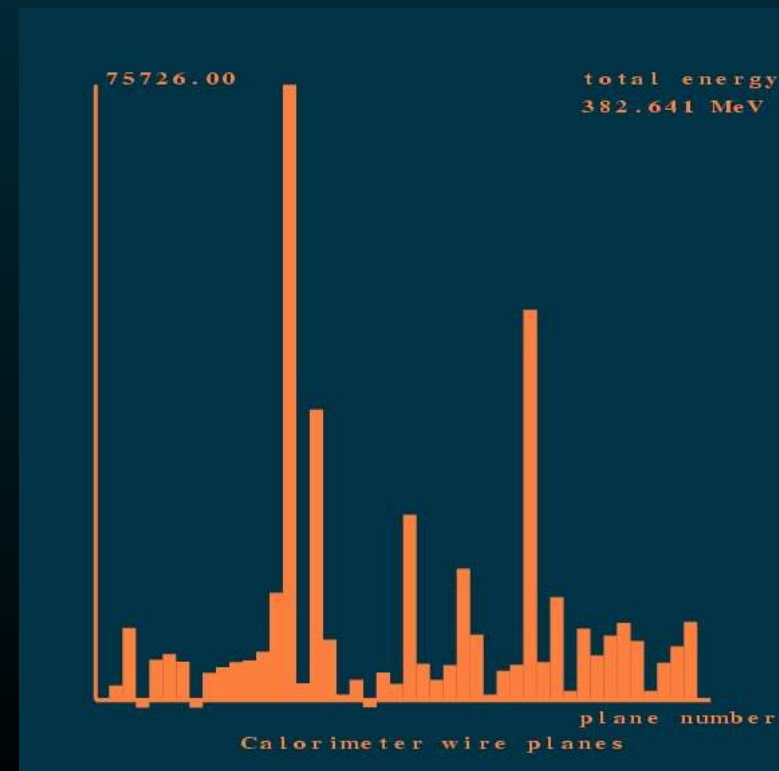


## Muons

### Leur identification

pénétration, chambres a muons, parcours  
forme du dépôt dans le calorimètre,  
lien à la trace

signe la présence d'un neutrino  
sauf  $\gamma$  ou Z, doubles





# Taus

Très importants pour la physique

Polarimètre, corrélations

Etat de CP du Higgs par sa désintégration en deux taus

modes de désintégration principaux

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

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

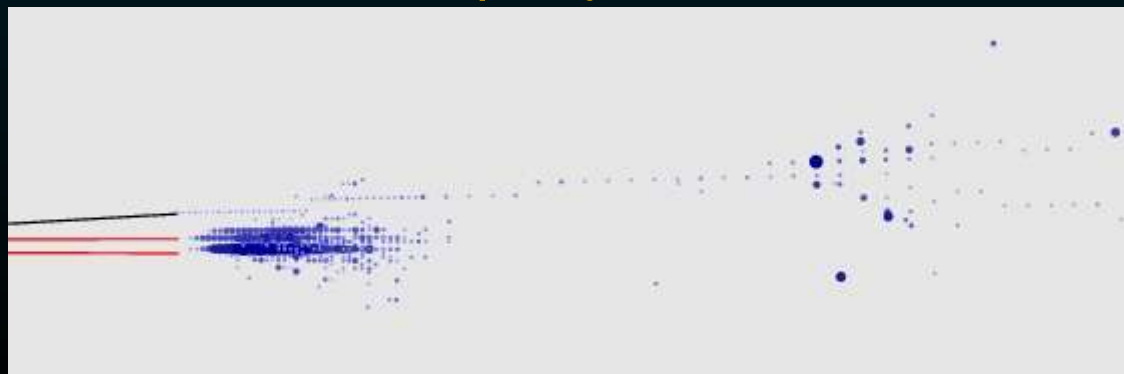
$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \pi^-$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \rho^-$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau a_1^-$$

il est essentiel de signer le tau, séparer les trois modes hadroniques

Savoir qu'il y a 0, 1 ou 2  $\pi^0$



## Mesure de la polarisation longitudinale du tau

Désintégration du  $\tau$  en  $\pi \nu$ .

Etablir la relation entre l'énergie du  $\pi$  dans le laboratoire et le cosinus de l'angle entre la ligne de vol du  $\tau$  et le  $\pi$  dans le CM du  $\tau$ .

$$E_{\pi} = E_{\tau}/2 (1 + \cos\theta)$$

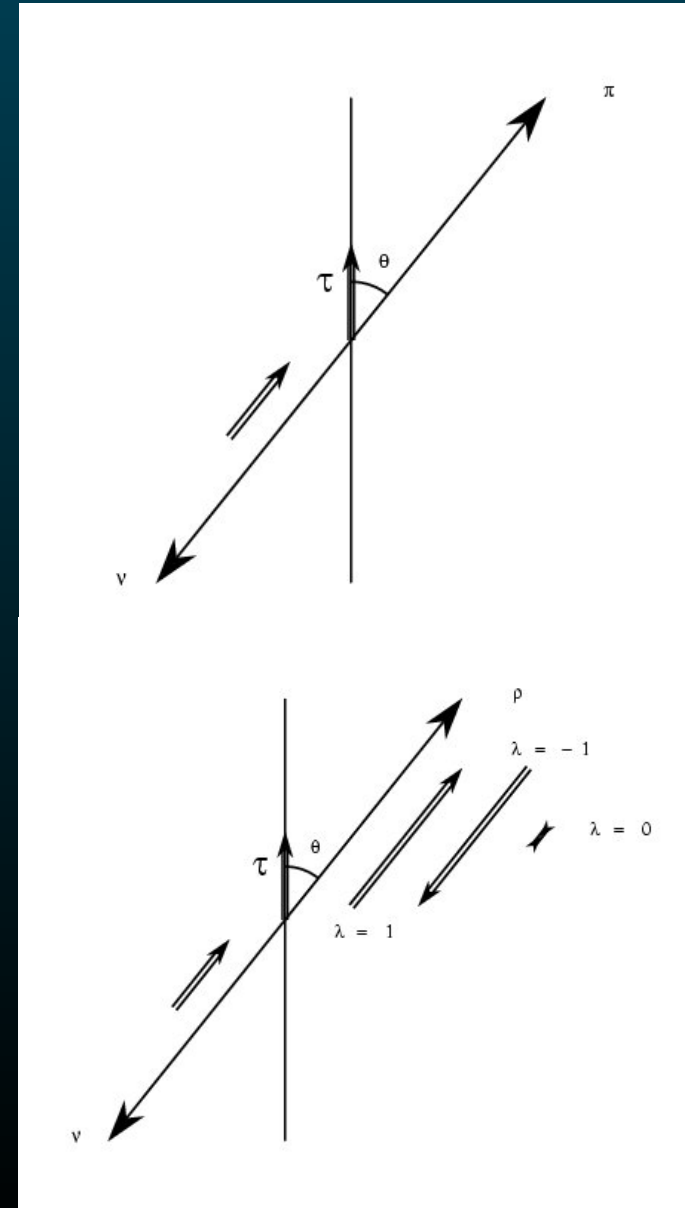
Polarisation et distribution angulaire

$$W(\theta) = (1 + P \cos\theta) d\cos\theta$$

$$W(E_{\pi}) = 1 - P + 2P E_{\pi}/E_{\tau}$$

Plus compliqué dans le cas du  $\rho$ , il existe une variable optimale  $\sim E_{\pi} - E_{\pi 0}$

$$m_{\tau} = 1,77 \text{ GeV} \quad m_{\pi} = 140 \text{ MeV} \quad m_{\nu} = 0$$



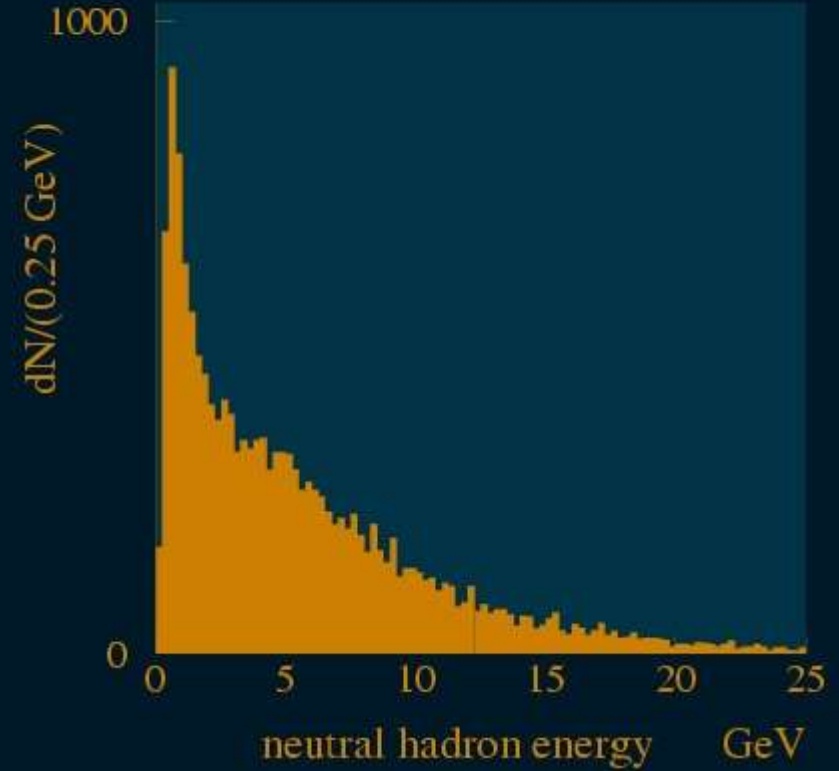
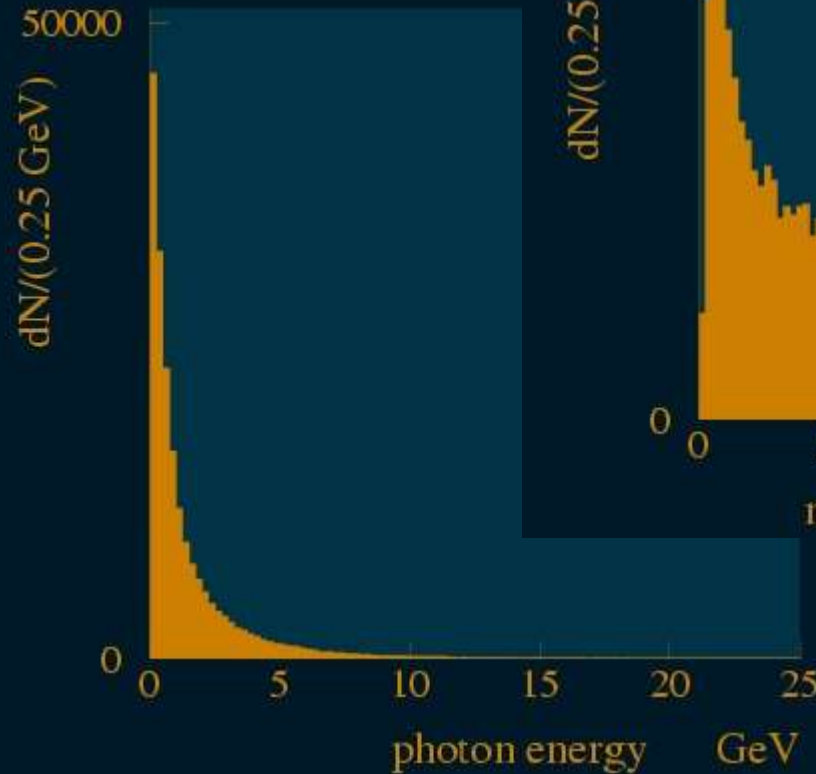
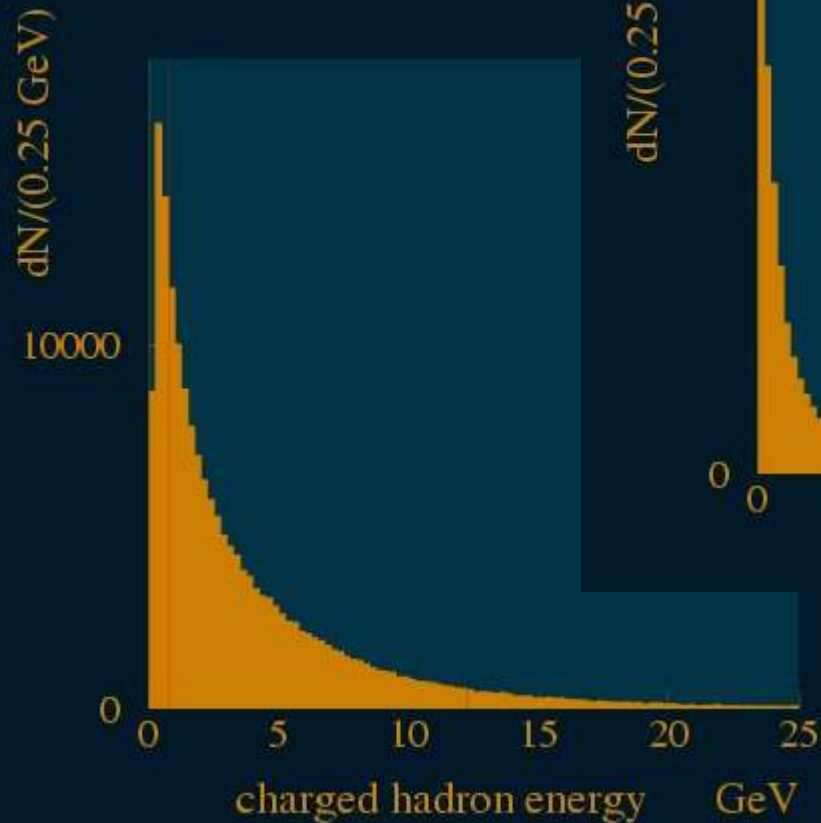
## Les hadrons et l'étude des flux d'énergie.

**Les hadrons chargés:** ils sont mesurés dans le trajectomètre et dans le calorimètre et ne sont pas identifiés comme leptons  
Savoir d'où ils proviennent  $\Rightarrow$  désintégrations

**Les hadrons neutres:** ne sont vus que dans le calorimètre

Fractions en énergie:	traces chargées	60%	dépend du type d'événement
	hadrons neutres	12%	
	photons	28%	

Les hadrons et l'étude des flux d'énergie.



$$E_{\gamma} = 1/2 E_{ch}$$

Tout est plutôt de basse énergie!

Pour mesurer les jets de particules on peut sommer leur énergie dans un calorimètre en s'efforçant d'avoir une réponse similaire aux particules électromagnétiques et aux hadrons.

(neutrons de basse énergie)

On peut aussi s'efforcer de séparer toutes les composantes, et mesurer

les chargés avec le trajectomètre,

les photons avec le calorimètre électromagnétique,

les neutres hadroniques avec le calorimètre.

C'est le principe de l'"energy flow".

## Bref rappel sur la calorimétrie

### électromagnétique:

le photon ou l'électron développent une gerbe d' électrons et positrons par Bremsstrahlung/création de paires

L'estimation de l'énergie déposée par ces chargés est une estimation de l' énergie incidente.

### hadronique:

les hadrons interagissent dans la matière en créant des hadrons chargés et des  $\pi^0$  ceux-ci créent des gerbes électromagnétiques les hadrons chargés déposent par  $dE/dx$ , mais effets nucléaires, création de neutrons lents

rapport e/h, compensation hard ou soft.

## energy flow

The challenge is 1) to effectively separate  
and not create fakes  
identify the decays  
2) to optimise the resolutions  
and particularly hadronic

Once the decays (secondary vertices) have been properly found we can write the 4-momentum of a set of particles as

$$P = \sum P_{\text{charged particles}} + P_{\gamma} + P_{\text{neutral hadrons}}$$

and

$$\sigma^2 = \sigma_{chp}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{nh}^2$$

In this ideal case  
with the values  
quoted above

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{0.18}{\sqrt{E}}$$

The photon resolution plays little role and the effort has to be on the hadronic resolution: going to 0.3 would achieve 0.12 on the jet



But for a real detector two effects play a role

- The existence of an effective threshold on
  - charged particles due to the high magnetic field needed for background, precision and separation
  - photons due to cell threshold and physical background

The probability of confusion

- efficiency of track reconstruction
- vertex misidentification
- wrong associations between tracks and calorimeter cells

$$\sigma^2 = \sigma_{chp}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{nh}^2 + \sigma_{conf}^2 + \sigma_{thresh}^2$$

The main enemy is confusion, far more than resolution and the design of the detector has to address this point first

possible algorithm for such a flow analysis

goes by descending order of clarity

tracks with vertices,  $V^0$ 's and  $\gamma$ 's

electron identification

photons from the Ecal knowing the tracks

muon identification

neutral hadrons, by topology with energy balance check

then build masses, energies, momenta for any set

The problem of hadronic shower is known to be related to the different response of the calorimeter to the hadronic component and to the electromagnetic one, i.e.  $\pi^0$

There are two solutions: one is to adjust the response to be equal, the other to identify the two components and weight them adequately

This last solution can be obtained by hardware or by some recognition, this is the case in H1 with a liquid argon calorimeter...

and that is what we recommend

These methods to optimise the hadronic resolution are often referred to as "energy flow" techniques as well and indeed the ideas behind are similar

As a result of these corrections depending on the energy density and the overall energy of the cluster

- less tails,
- more Gaussian distribution
- better resolution (by 15%)

An approach by neural net on LC simulation gives an improvement of 30%.

This means that we have to have the capability to distinguish electromagnetic and hadronic components.

This may rely on energy density measurement if the cell size is adequate

- Remember that it is possible to tune the response by playing with the interaction/radiation length ratio, (10 for Fe, 30 for W).

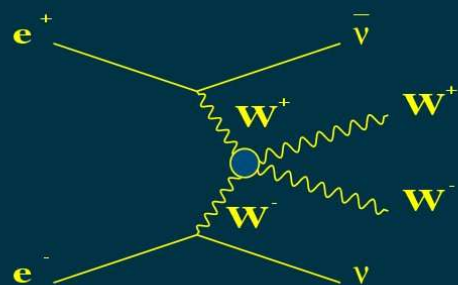
Atouts et difficultés liées à la machine

Les contraintes de la machine

Atouts

Événements propres  
pas d'empilement

Le laboratoire est essentiellement le centre de masse



On pourrait donc attendre des distributions angulaires raisonnablement isotropes

(par exemple à la  $1 + \cos^2\theta$  comme dans  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ ),

mais attention,

une très grande part de la physique est à l'avant !!

Bonne définition du vertex

Possibilité de mesurer les traces très près du point d'interaction, 1,4 cm  
c'est en fait limité par les paires

Pour la machine supra bonne séparation en temps des événements

Mais

Pour les réactions perte partielle de la contrainte de conservation d'impulsion-énergie en raison du beamstrahlung.

Bruit de fond de paires dû au beamstrahlung.

Mesures de l'énergie, de la luminosité, de la polarisation

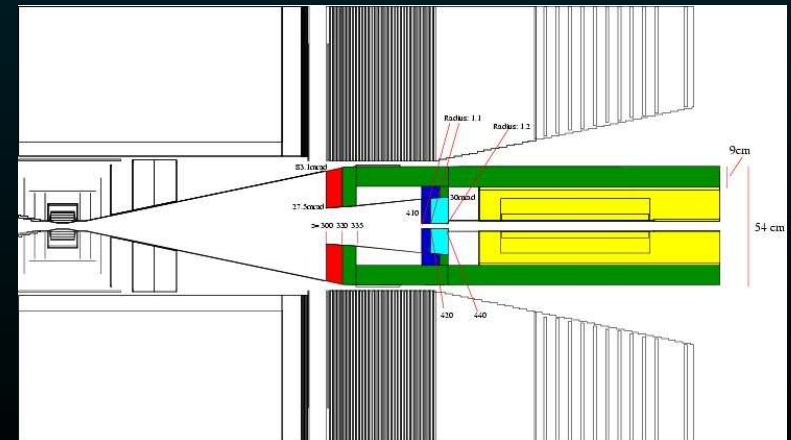
Timing délicat pour une machine chaude.

# Les degrés de liberté

## Le design du détecteur

Comment assurer:

l'herméticité jusqu'à des angles très faibles  
où un champ axial devient inefficace  
la mesure des chargés et celle des neutres  
l'identification des leptons



Le dessin caractéristique

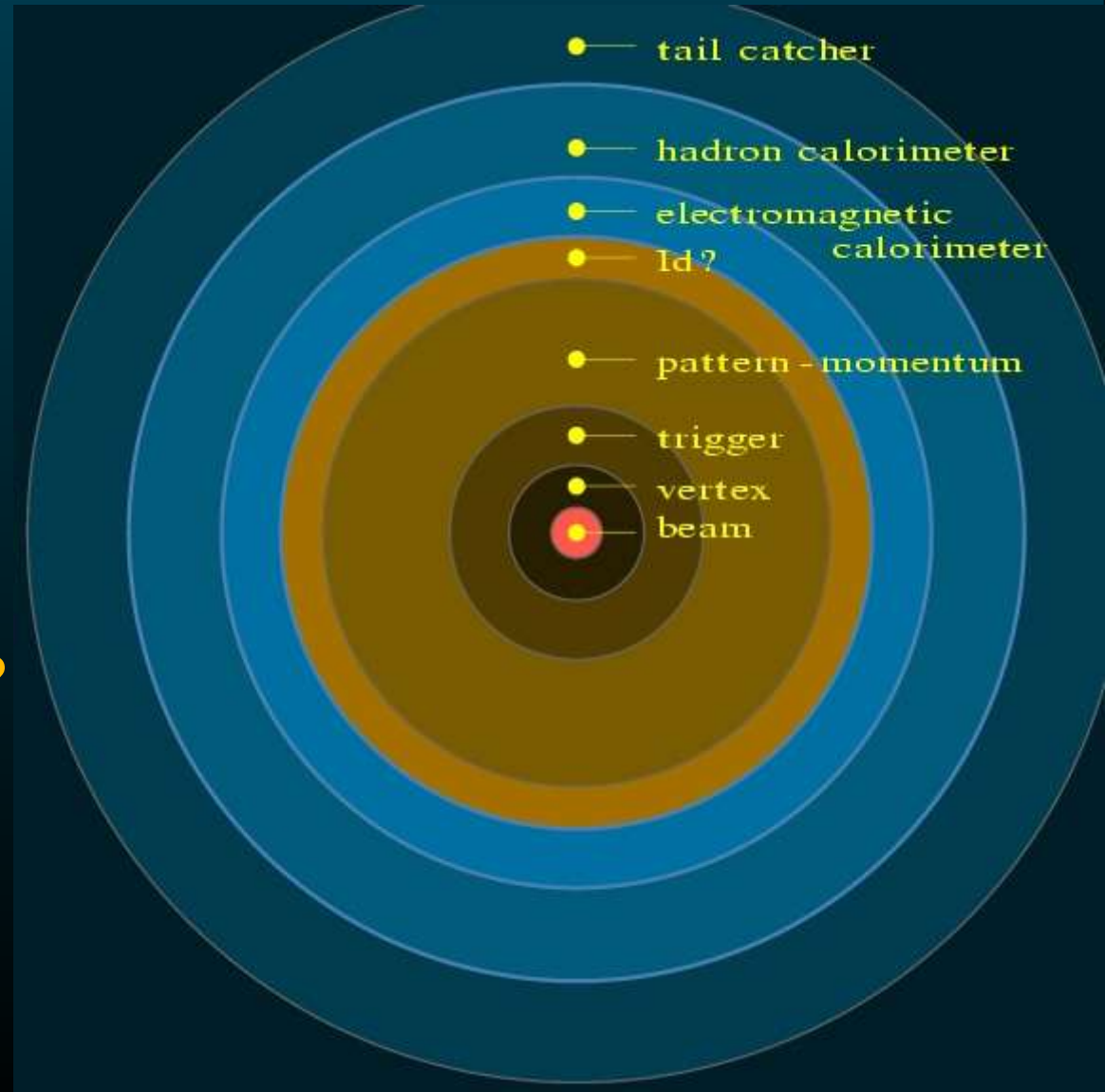
Un oignon avec le trajectomètre au centre le calorimètre en périphérie

Et la bobine?

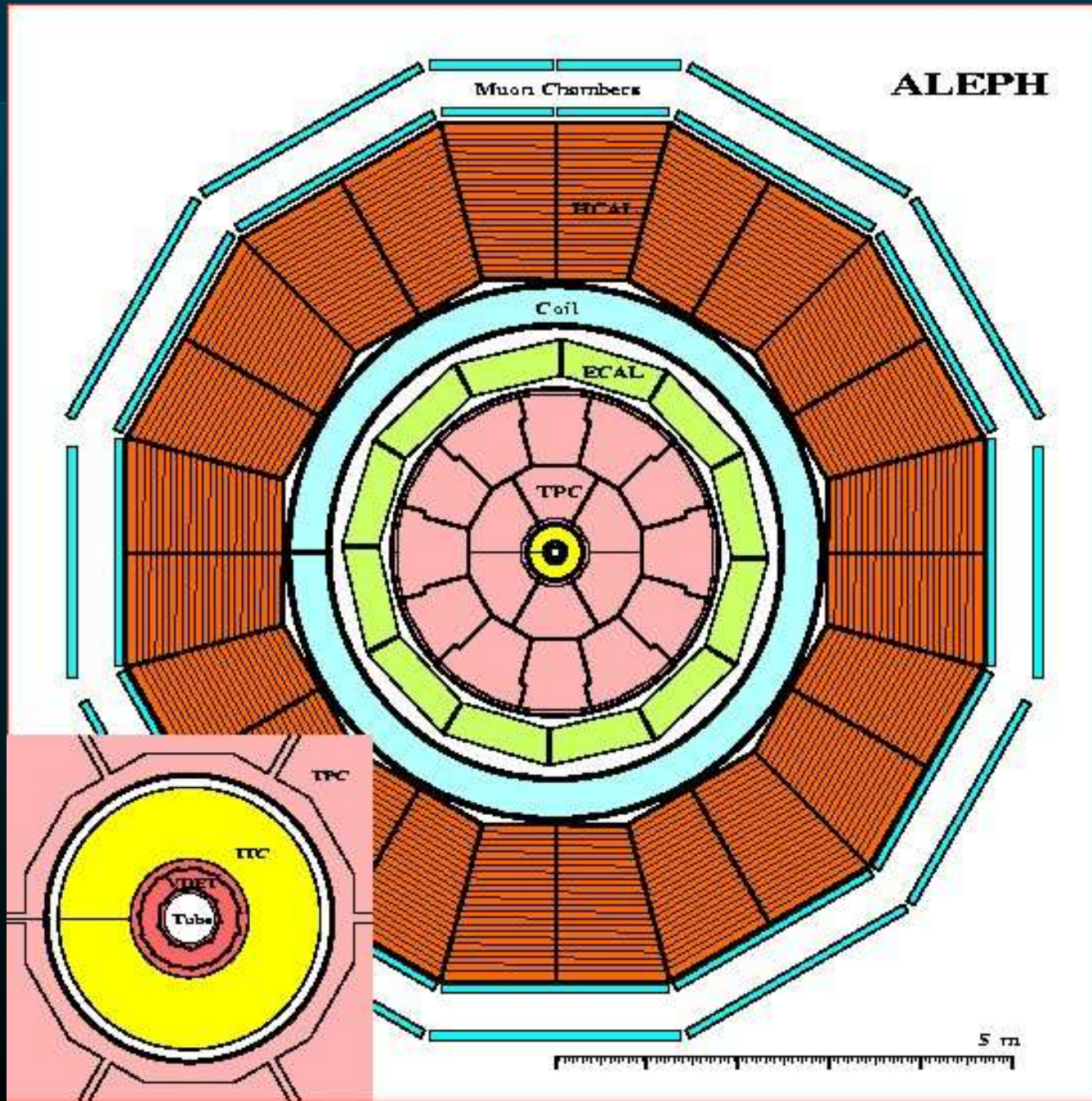
historiquement elle fut d'abord après le trajectomètre après le calorimètre élec-magn

ALEPH par exemple

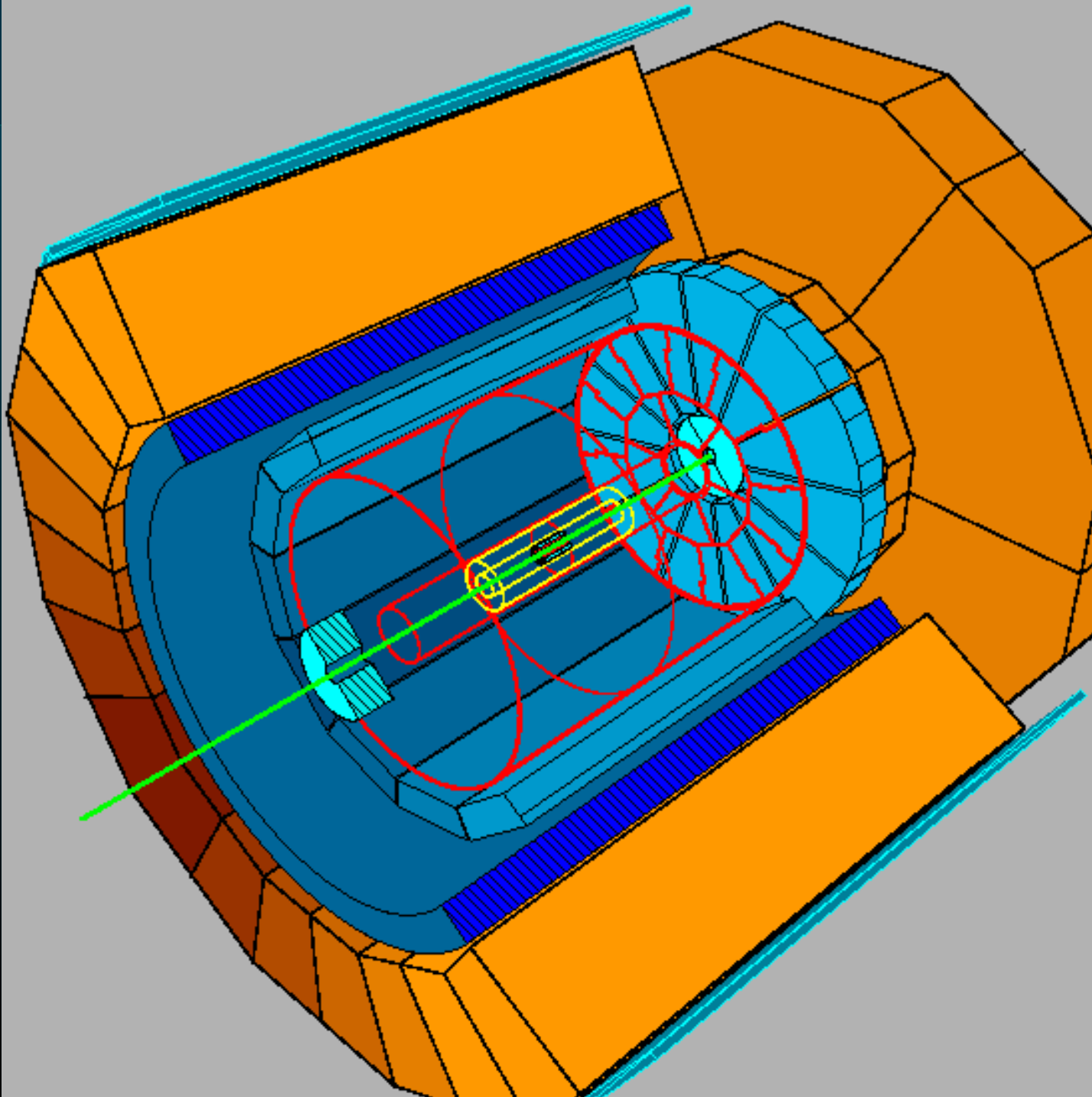
après le calorimètre hadronique? quid du ramasse-queuees?







**ALEPH**  
un détecteur  
du LEP



ALEPH  
un détecteur  
du LEP

## Recette pour un détecteur de vertex

Très précis,  
proche du vertex,  
très transparent,  
avec suffisamment de couches pour pouvoir  
faire sa propre analyse de traces

précis: intrinsèquement (pixels),  
alignement a priori, par les données

proche du vertex, mais cela induit un fort bruit de fond,  
résistance aux radiations, taux d'occupation

transparent donc mince avec un minimum de structures  
et d'électronique mais stabilité

nombre de couches, coût

## Recette pour un trajectomètre central

Précision en BR2

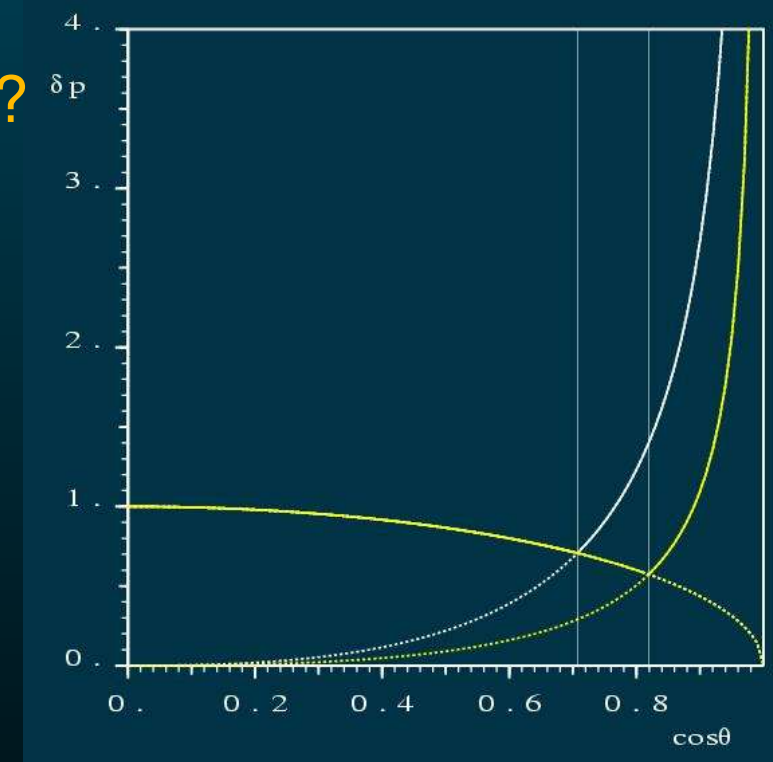
mais R à l' avant??

Quel champ? 3, 4, 5, 6 T?

Stabilité mécanique en  $B^2R$

A l' avant nous ne comptons que sur  
l' ouverture cinématique:

faire grand!!



mais stabilité, alignement, distorsions, coût!!

et il ne sert de faire grand que si la séparation est adéquate.

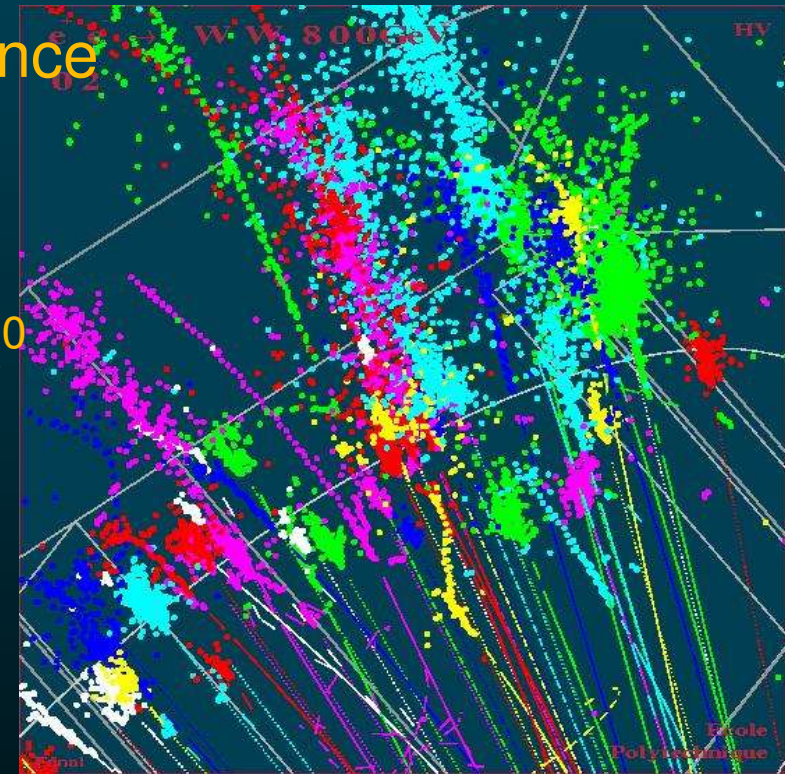
Dilemme: petit précis (forte séparation) / grand négligé?



## Recette pour un calorimètre

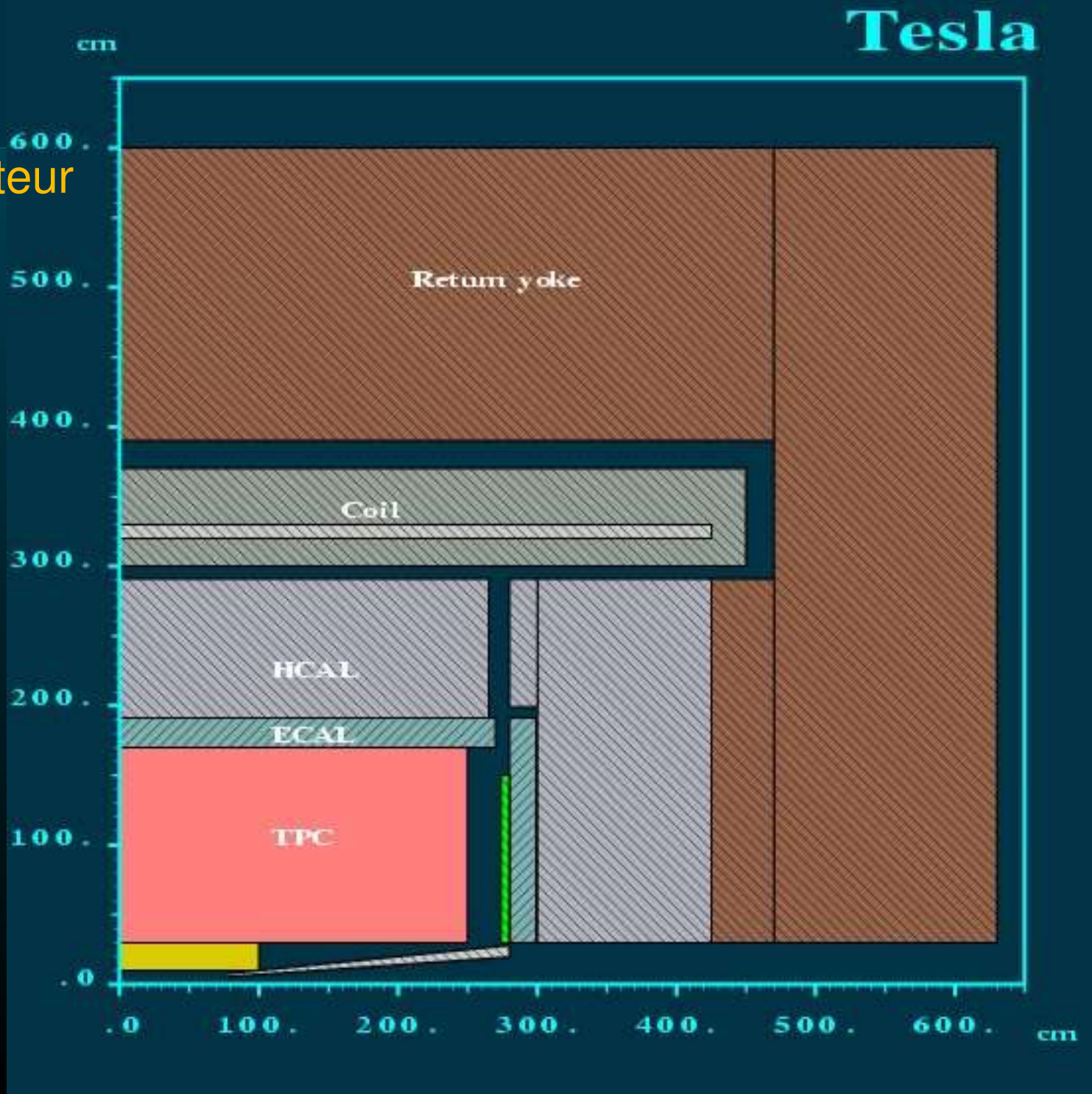
Les neutres ne se séparent que par la distance  
 donc aussi loin que possible

partie électromagnétique: large rapport  $\lambda_f/X^0$   
 de bonne profondeur  
 très dense  
 très granulaire  
 $\sim 1R_M$   
 pas de trou vers la



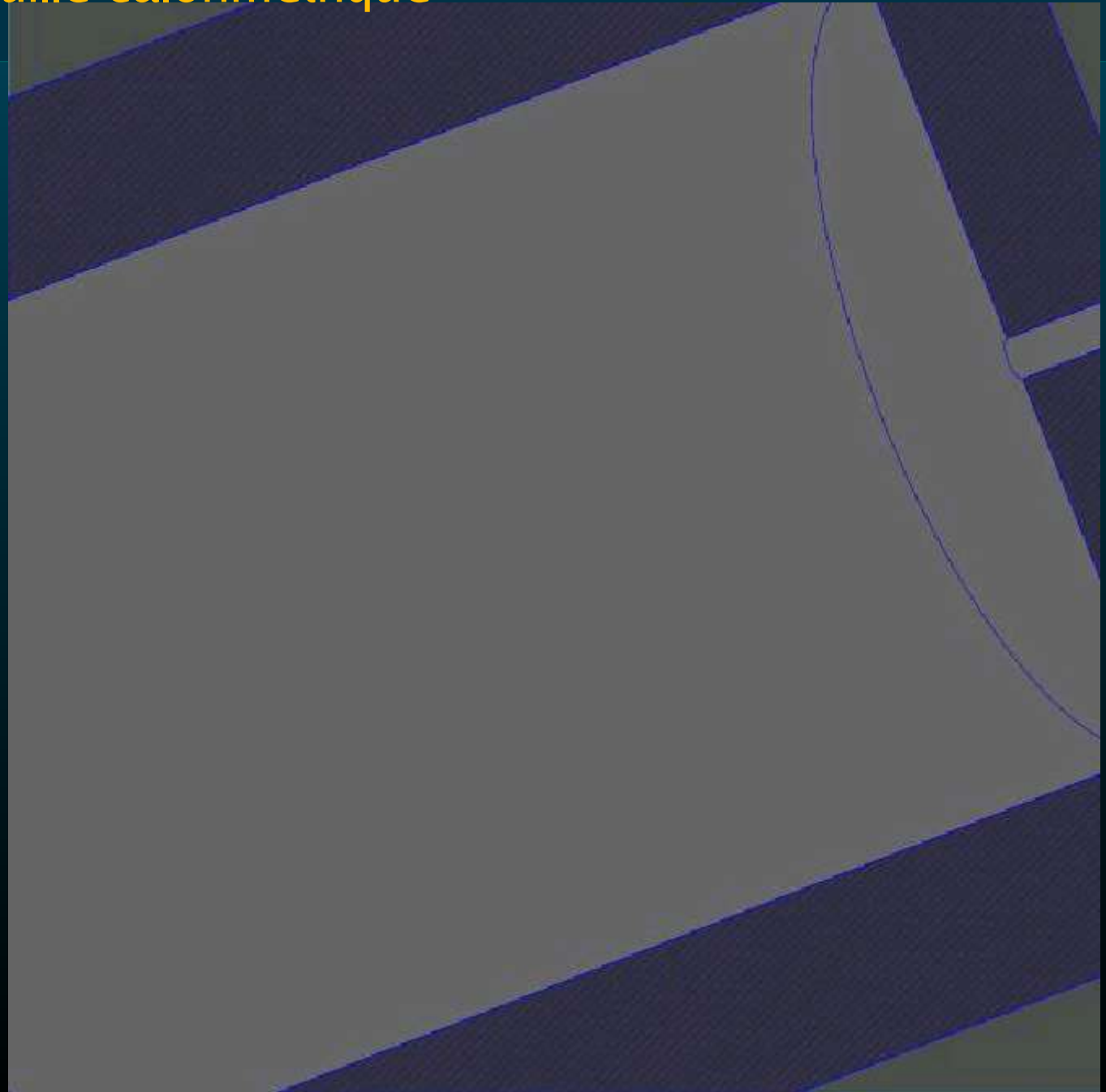
partie hadronique: dense, où les gerbes restent étroites  
 avec le bon rapport  $\lambda_f/X^0$   
 très granulaire

Coupe du détecteur  
un quadrant



## Mise en place de la coquille calorimétrique

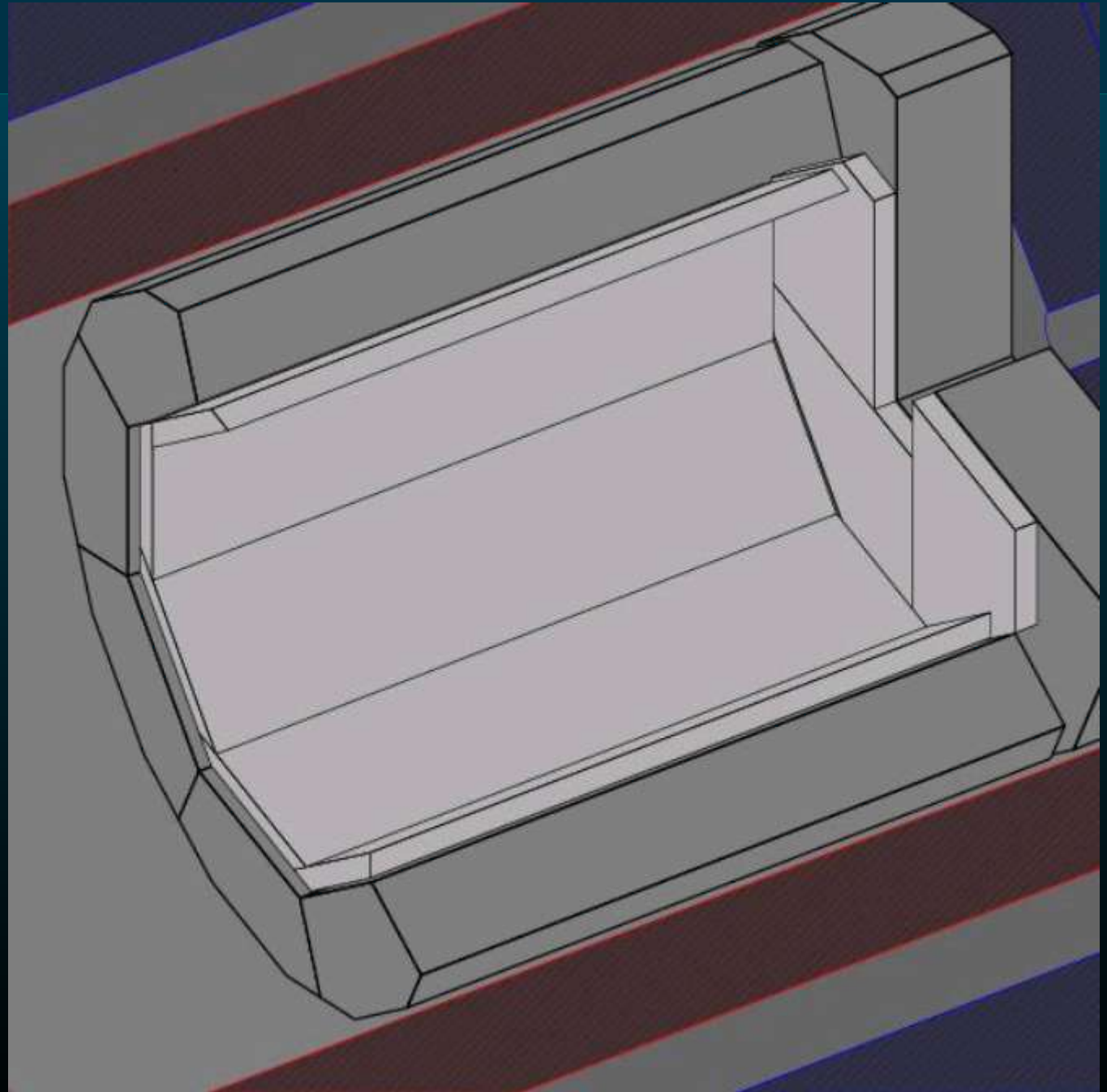
Retour de champ  
détecteur de mus  
Bobine 4T  
Pôle  
Bouchon Hcal  
Baril Hcal  
Bouchon Ecal  
Baril Ecal



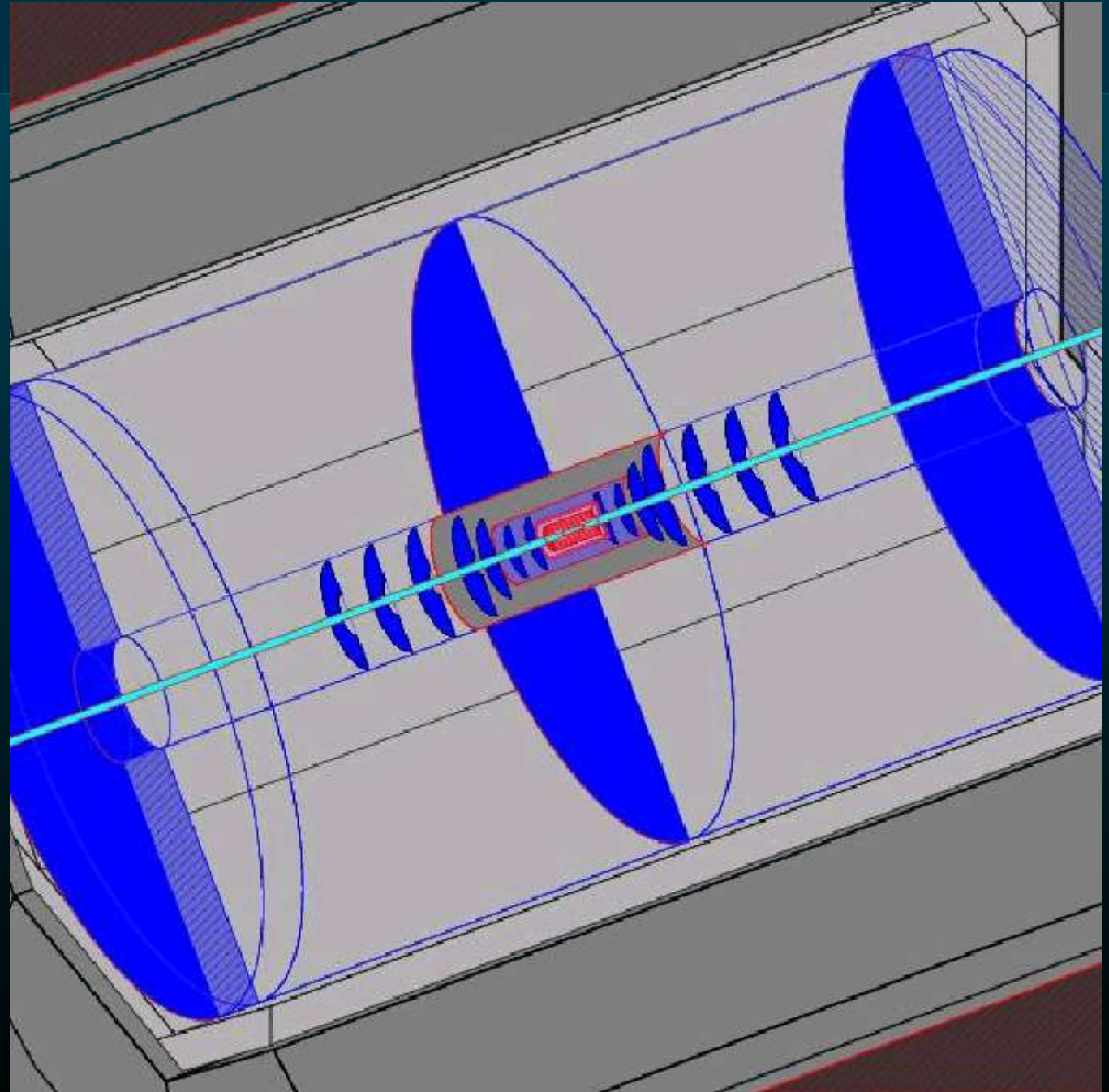


# Détecteurs de trace

- Forward chambers
- TPC
- SIT
- Forward disks
- Détecteur de vertex
- Tube à vide







## Déclenchement et acquisition

En raison des faibles bruits de fond, de la rareté des événements, de la volonté de ne rien perdre,

GMSB

**Pas de déclenchement,**  
si ce n'est un auto-trigger des cellules de mesure

Reconnaissance du croisement responsable de l'interaction

Acquisition peut souffrir des longs trains

# Les technologies

Une revue partielle des technologies envisagées pour:

détecteur de vertex

silicium CCD ou CMOS

trajectomètre central

silicium strips, gaz TPC

calorimètre électromagnétique

silicium, scintillateur  
cristaux?

calorimètre hadronique

scintillateur, gaz

ramasse-queue

détection à petit angle

# Les technologies

## déTECTEUR de vertex

but premier la précision du paramètre d' impact des traces pour identifier des vertex déplacés.

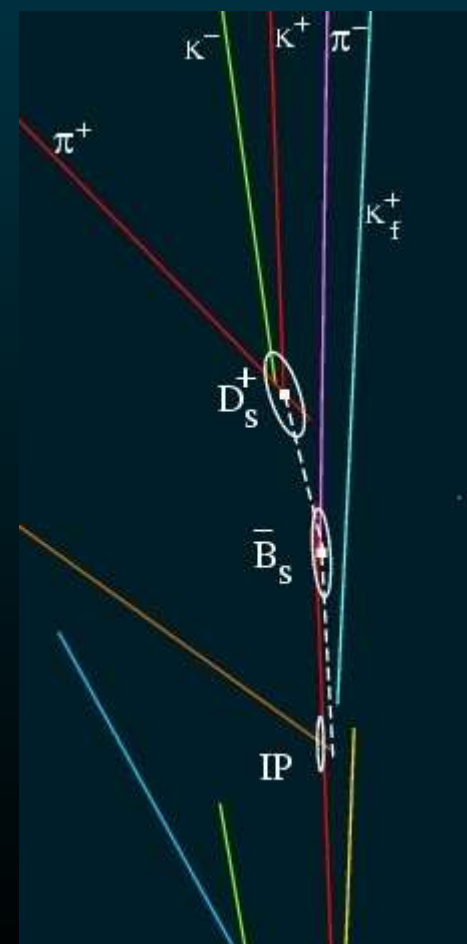
critère de qualité: résolution spatiale

accessoirement

ce détecteur fait partie intégrante du trajectomètre et contribue à la précision de la mesure de l' impulsion et à la reconnaissance des traces

il peut aussi contribuer à l' étalonnage d'une TPC

les critères sont précision,  
quantité de matière,  
vitesse de lecture



# Les technologies

## déTECTEUR DE VERTEX

### Une technologie : le silicium à pixels

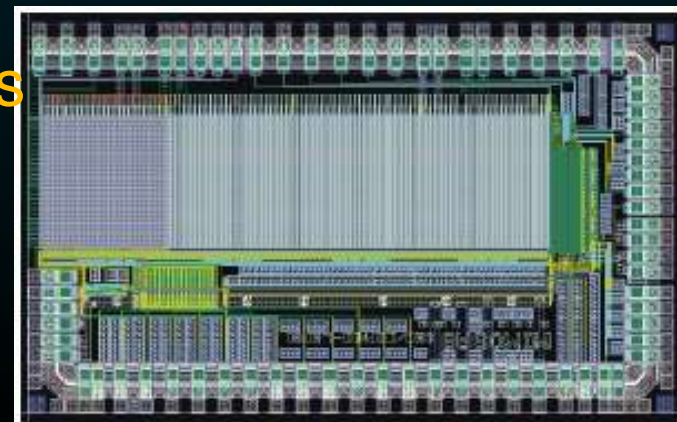
Solution classique: CCD mais problème de vitesse de lecture  
par rapport à la longueur des trains  
lecture par colonnes

taille des pixels environ 10 microns  
feuilles de silicium très minces, 60 microns

### Solution plus récente: CMOS

pas de silicium détecteur,  
un chip qui collecte par diffusion  
les électrons déposés dans le substrat

développement d'une lecture rapide  
intégration sur la puce de nouvelles fonctions  
cellules sensibles de  $20 \times 20 \mu\text{m}$   
supporte 100 fois les flux attendus au LC  
 $2 \mu\text{m}$  de résolution mesurés en faisceau  
aminci à  $120 \mu\text{m}$ .

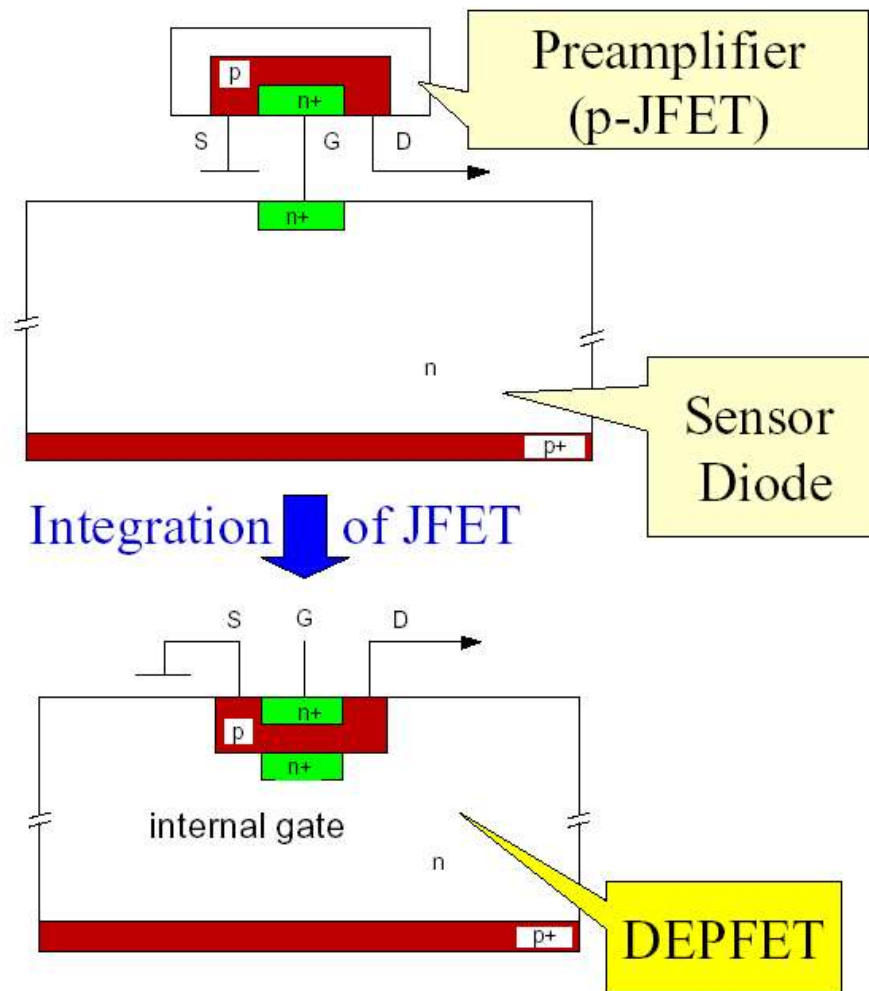


# Les technologies

## détecteur de vertex

### Autres solutions DEpFET

#### DEPFET - principle idea



Kemmer, Lutz (1987):

- integrate preamplifier into Sensor Si- Substrate

Advantage:

- Small input capacitance
- no stray capacitance

⇒ Large Signal to Noise Ratio

# Les technologies

trajectomètre central

2 solutions: silicium à la CMS mais plus mince!  
déTECTEUR gazeux TPC  
mixte

## Silicium

à partir d'un certain rayon, le taux d'occupation est tel que des strips suffisent et non des pixels

faire mince tout en assurant la précision de positionnement  
problèmes de support et de l'électronique



# Les technologies

trajectomètre central

## TPC

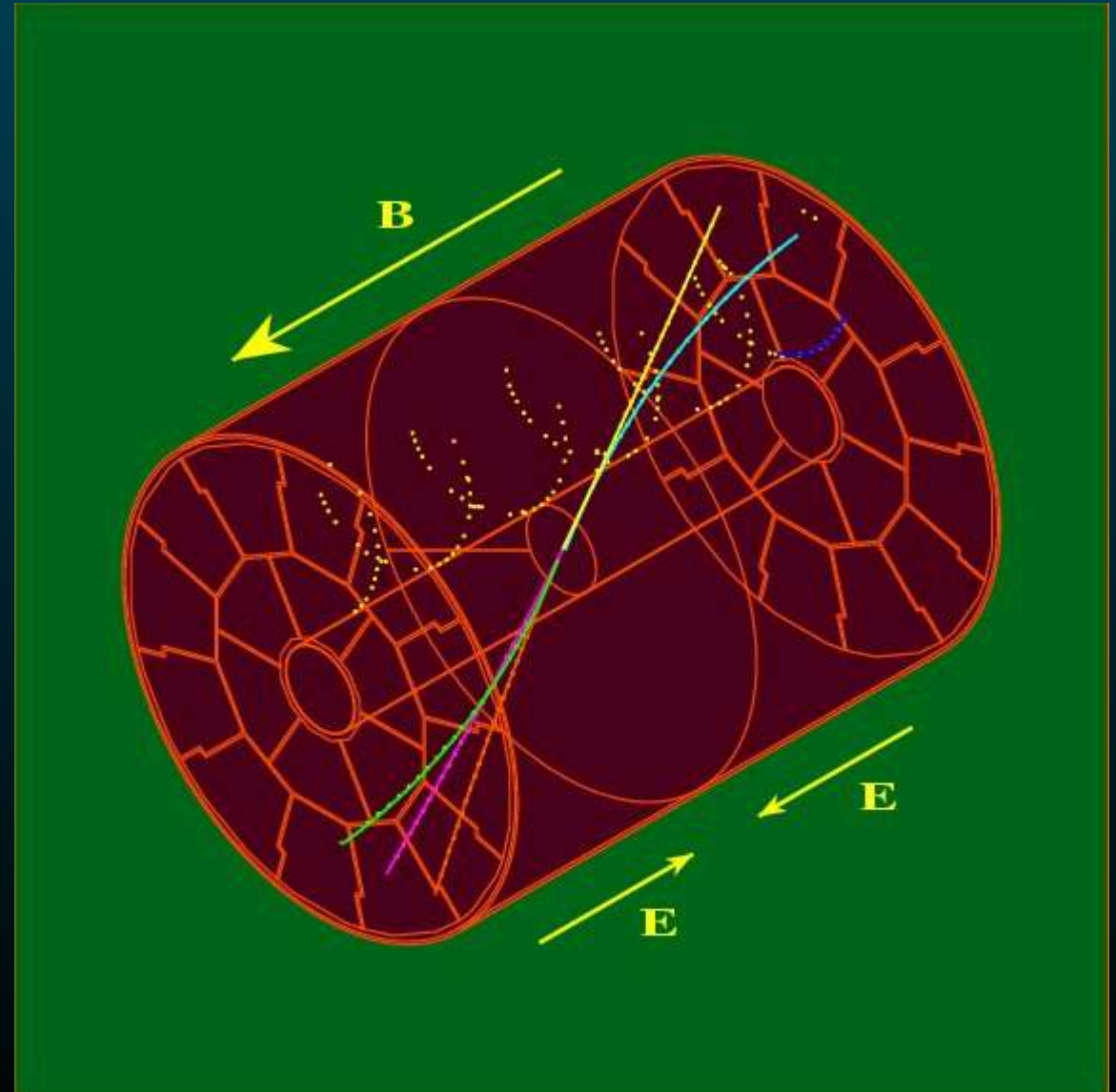
classique mais  
gaz et  
sensibilité aux neutrons

limiter le retour d' ions

grande précision,  
maîtriser les distorsions

détection des électrons:  
au lieu de fils,  
GEM, MicroMegas,  
silicium

offrant une bien meilleure granularité





# Les technologies

trajectomètre central

## Mixte

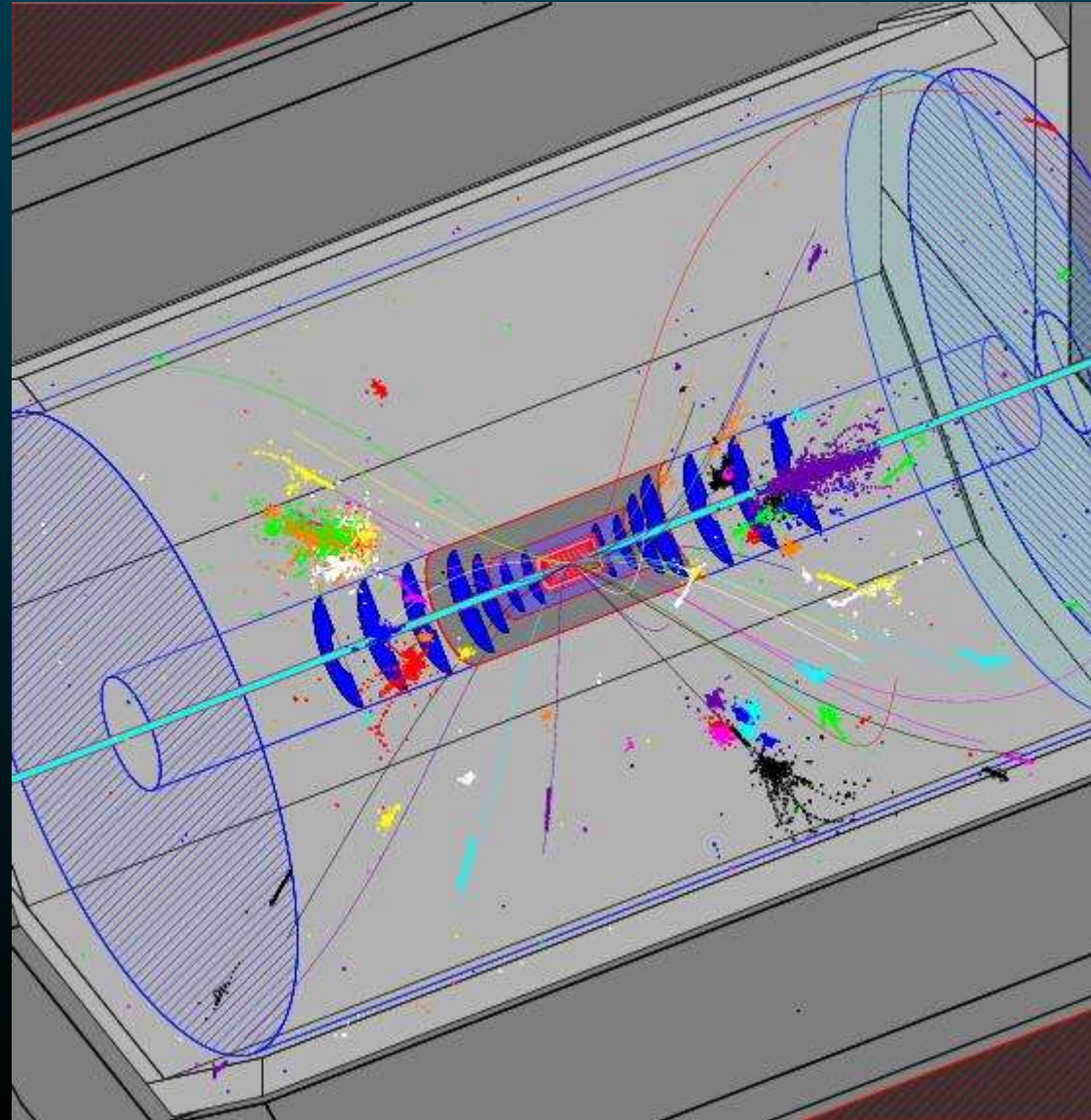
Pour des raisons de distorsions, une TPC ne peut commencer à un rayon trop faible.

TESLA TDR 30 cm

Le détecteur de vertex (pixel) finit à 10 cm

La TPC offre une mauvaise précision à petit angle

On équipe la zone vide avec quelques cylindres ou disques de Si lus en strips



## trajectomètre central

On peut envisager une couche de silicium à l'extérieur de la TPC pour améliorer la résolution en impulsion.

Deux arguments pour la TPC:

la redondance est énorme ( $> 100$  points par trace)

$\Rightarrow$  pattern aisé, en particulier pour les  $V^0$ .

le  $dE/dx$  dans un gaz présente une remontée relativiste qui permet l'identification des électrons jusqu'à  $10-20$  GeV

Deux questions:

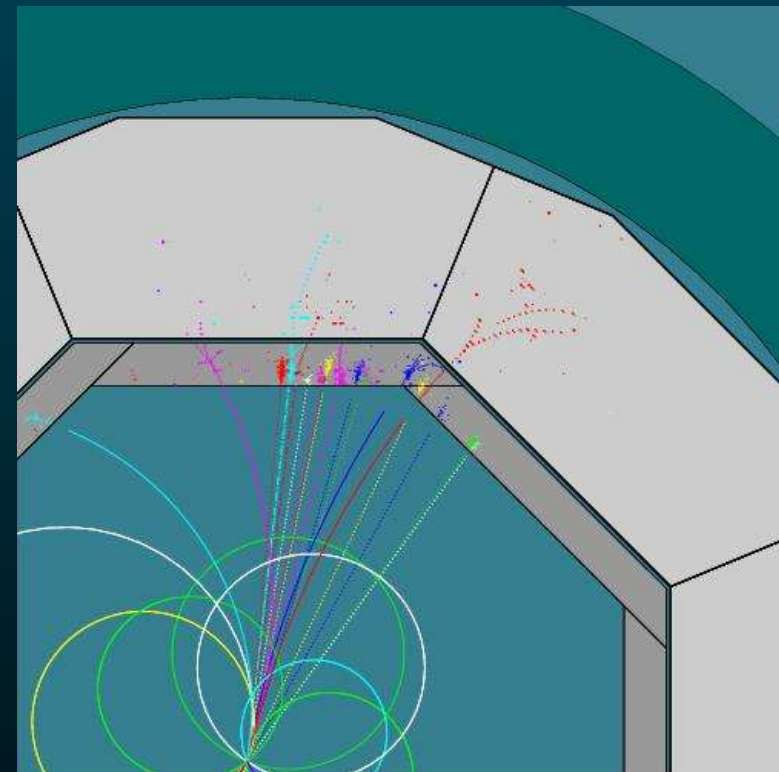
quelle sera la précision d'un point  $100 \mu$ ? et les distorsions?

quelle matière, encombrement devant le ECAL?

# Les technologies

## calorimètre électromagnétique

but: grande compacité, herméticité,  
grande séparation  
d'où granularité tant transverse  
qu' en profondeur  
la résolution en énergie  
n'est pas un critère décisif



solutions classiques:

cristaux, TB résolution, pas de séparation longitudinale

argon liquide, cryogénie

gaz, résolution médiocre, faible compacité

scintillateur, faible granularité, difficulté de lecture

# Les technologies

## calorimètre électromagnétique

La préférence aujourd' bi va aux sandwichs tungstène silicium

silicium, stable, bonne résolution, excellente possibilité de granularité

Typiquement  $24 X_0$  sur moins de 20 cm, un RM de 1,4 cm  
une résolution de 10 à 15% selon le nombre de couches.  
Lecture par des damiers de taille  $\leq 1 \text{ cm}^2$

Très grand nombre de voies de lecture, surface de silicium, coût  
1 à 2 \$ du  $\text{cm}^2$

# Les technologies

calorimètre hadronique

calorimètre analogique

Des solutions classiques: scintillateur inox  
cellules de taille variables mais cherchent à être petites  
sortir la lumière (fibres) ou lecture in situ SiPM.  
Collecte de l'énergie déposée dans les cellules

Mais

calorimètre digital

la résolution peut-être meilleure et la granularité plus élevée  
en ne lisant les cellules que par oui/non:  
cellules de gaz de  $1\text{cm}^2$  lues numériquement, RPC , lecture in situ

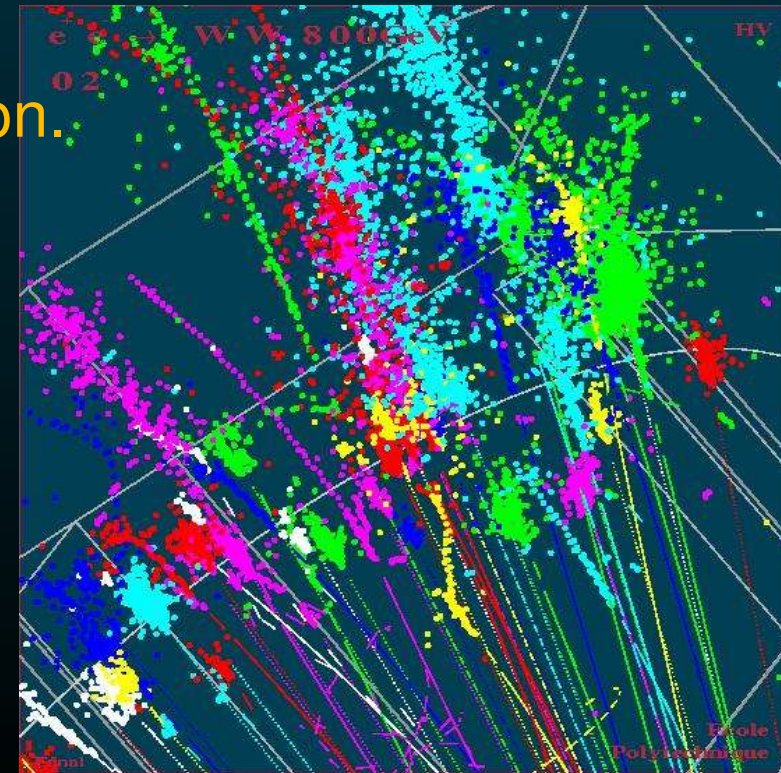


# Les technologies

## calorimètre hadronique

Un très intéressant développement logiciel,

la reconnaissance des gerbes  
et leur association aux traces  
dans un calorimètre très granulaire,  
l'optimisation de la résolution par pondération.



# Les technologies

collecteur de queues  
et détecteur à muons

Des techniques relativement classiques  
RPC ou tubes, les taux d'occupation et la diffusion multiple  
font que les dualités requises sont aisées.

# Les technologies

## détecteur à petit angle

Flux considérables de paires

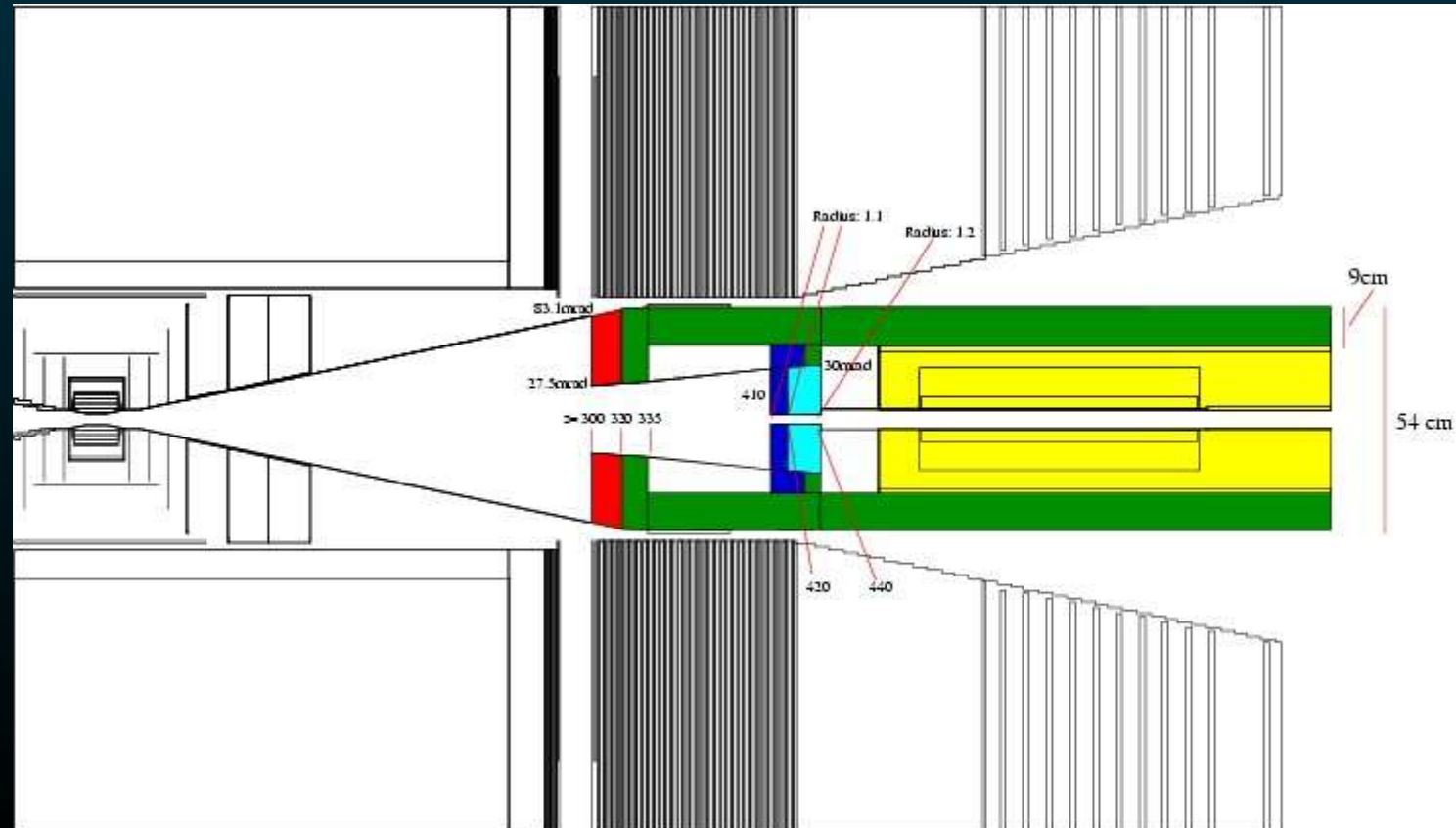
Ne pas avoir de trou!

Voir les électrons à l'avant

Limiter le retour dans le détecteur

Calorimètre très résistant.

Tungstène-diamant?





par rapport aux détecteur LEP:

10 fois mieux en impulsion,

10 à 100 fois plus granulaire

2 fois mieux en énergie (jets)

pas de seuil.

Un détecteur plein d'innovations  
amusant à concevoir

qui par son grain, sa résolution et l'absence de déclenchement  
doit permettre une collecte optimale de la physique  
accessible entre le Z et 1 TeV.

Fin de nos considérations sur les détecteurs