

Un détecteur de physique de hautes énergies : ALICE au LHC

Alexandre SHABETAI



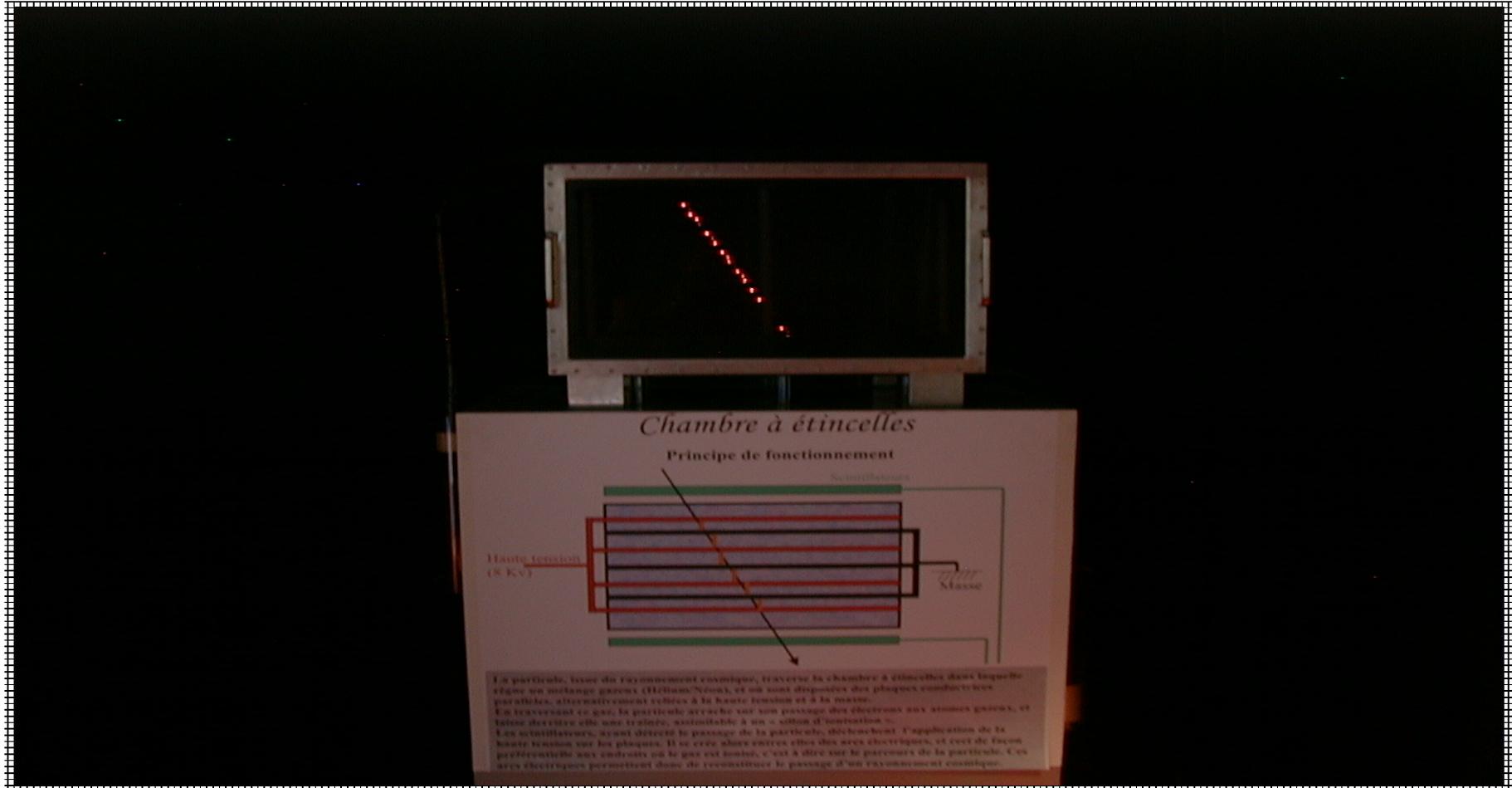
ALICE

Masterclass 2015 - Nantes

1



A t'on vraiment besoin d'un accélérateur pour produire des particules ?



Rayons cosmiques (astroparticules) produits de façon naturelle



ALICE

Masterclass 2015- Nantes



LHC



ALICE

Masterclass 2015 - Nantes

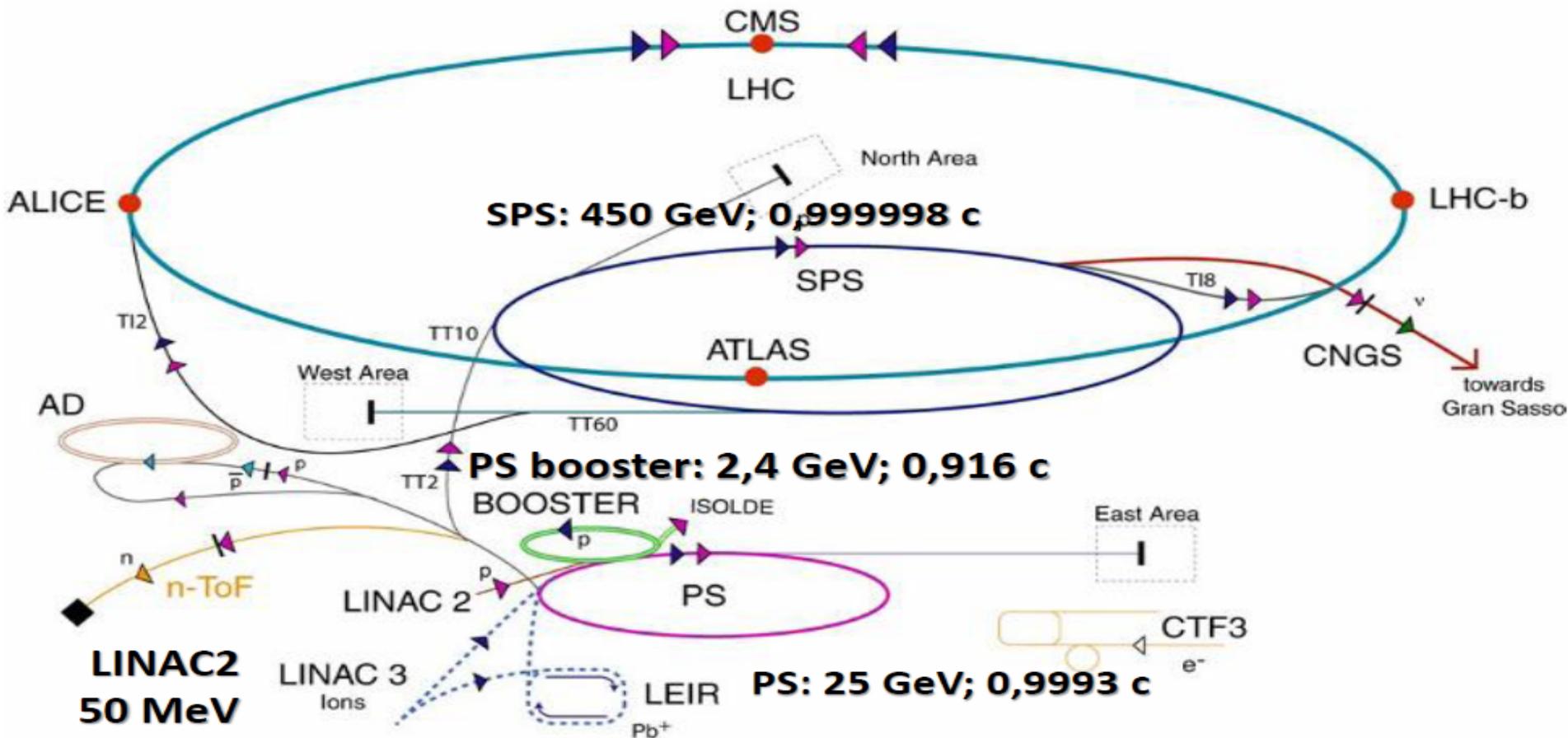
3



Chaîne d'accélérateurs

Large Hadron Collider

LHC: 7 TeV; 0,999999991 c



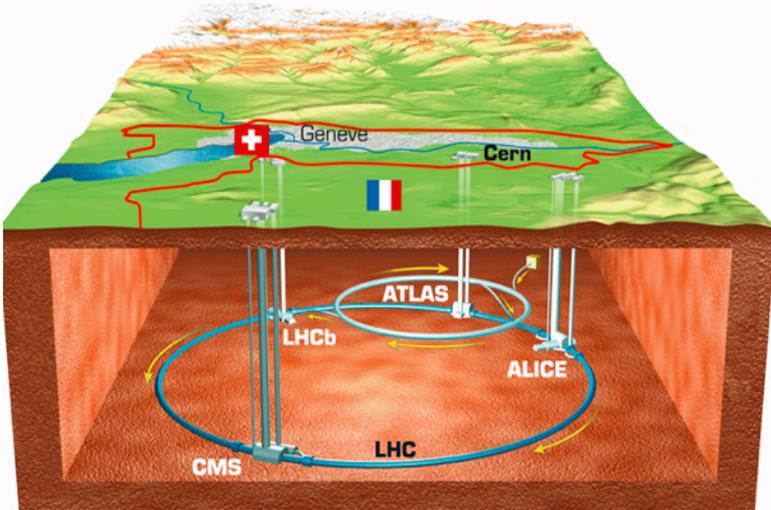
- ▶ protons
- ▶ antiprotons
- ▶ ions
- ▶ electrons
- ▶ neutrons
- ▶ neutrinos

- AD Antiproton Decelerator
- PS Proton Synchrotron
- SPS Super Proton Synchrotron

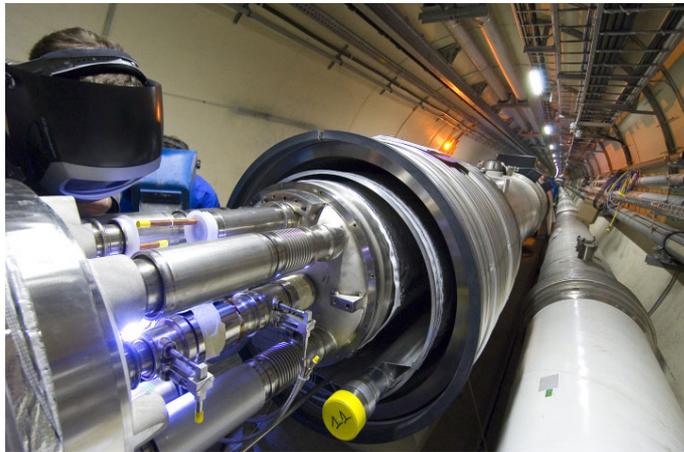
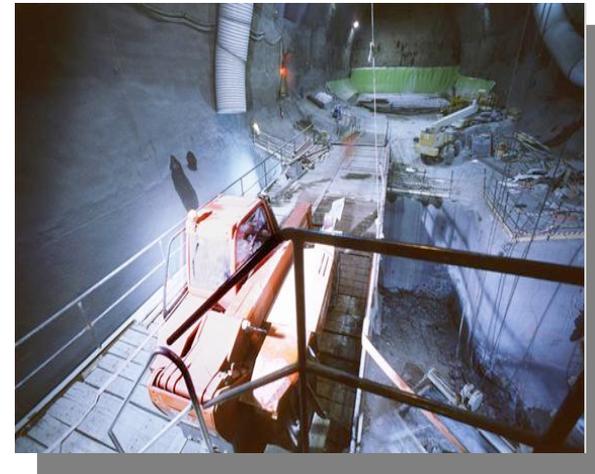
- LHC Large Hadron Collider
- n-ToF Neutron Time of Flight
- CNGS CERN Neutrinos to Gran Sasso

CTF3 CLIC Test Facility 3

Prouesses technologiques du LHC



27 km de circonférence, à **100 m sous terre**, à proximité des nappes phréatiques et du Jura !



1600 électro-aimants supraconducteurs



ALICE



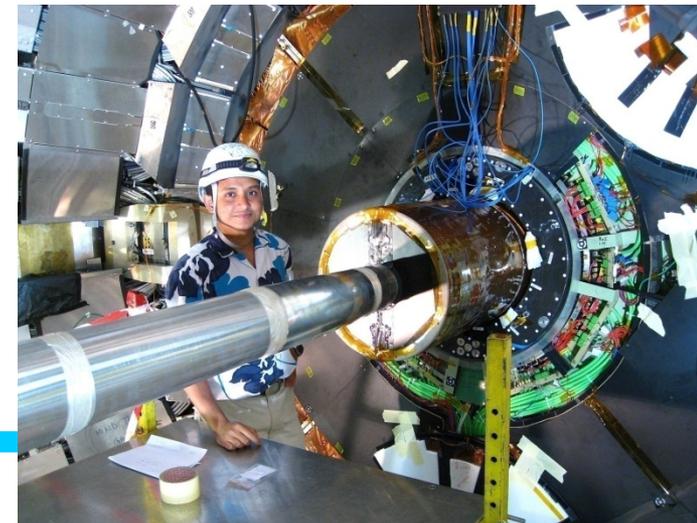
Prouesses technologiques du LHC



Un endroit **plus froid que le vide intersidéral** :
-271 °C, soit 1.9 K



Des tubes à faisceau **ultra vides**,
 10^{-13} atmosphère

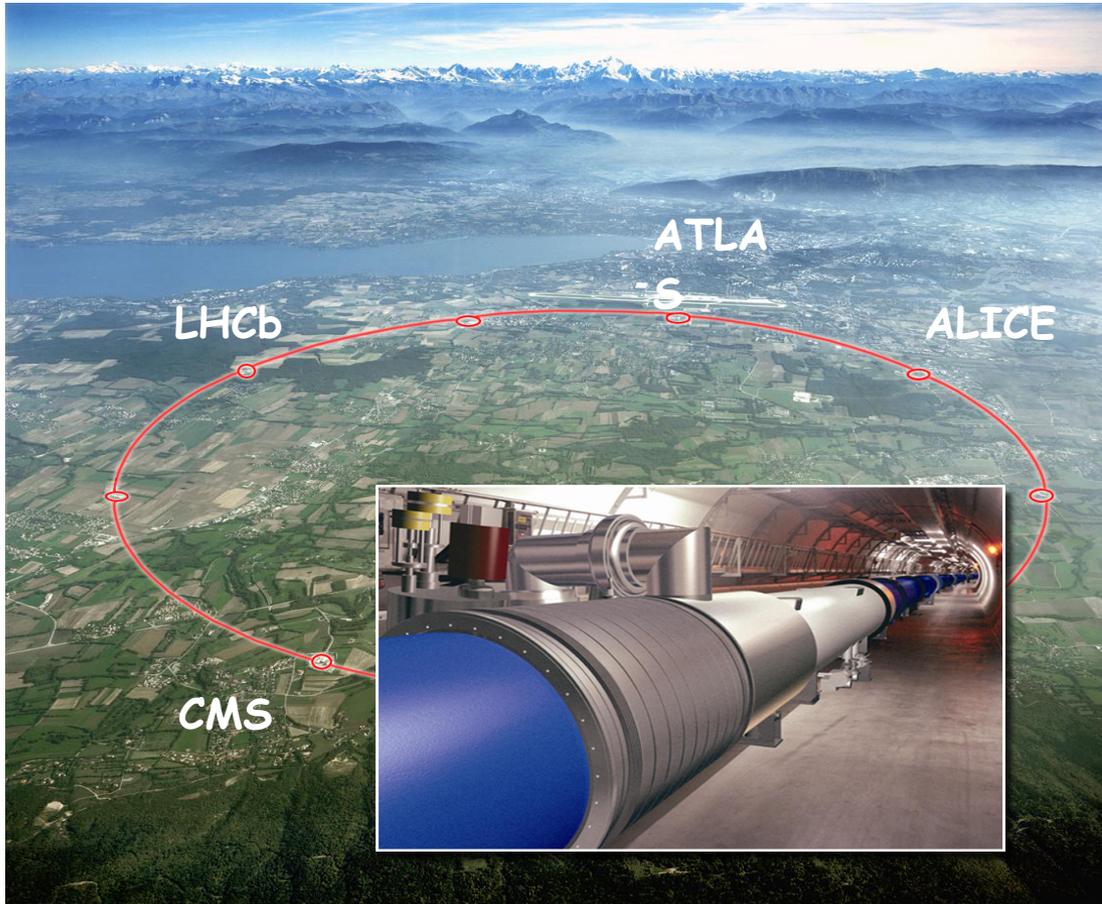


Quelques chiffres

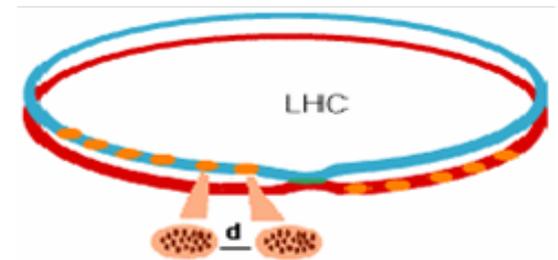
- Le faisceau circule ~ 10 h dans le LHC et parcourt **10 milliards de km**, soit un aller-retour vers **Neptune**.
- Les protons circulent à **99,9999991%** de la vitesse de la lumière, soit **11245 tours** (de 27 km) à la seconde Ils sont obtenus à partir d'hydrogène. Environ **2 nano-grammes** d'hydrogène est accéléré **chaque jour** Il faudrait un million d'années au LHC pour accélérer un gramme ...
- Les collisions ont lieu toutes les **25 ns** (10^{-9} s), soit **40 millions de collisions faisceau-faisceau par seconde** soit environ **600 millions de collisions de protons par seconde**.
- L'énergie d'un faisceau de protons de **7 TeV** est équivalente à **350 MJ** (soit un **TGV** de 400 tonnes) lancé à **150 km/h** serait suffisante pour faire fondre **500 kg de cuivre**.



4 points de collisions exploités par 4 expériences



Des paquets de protons sont accélérés à une **vitesse** proche de celle **de la lumière**

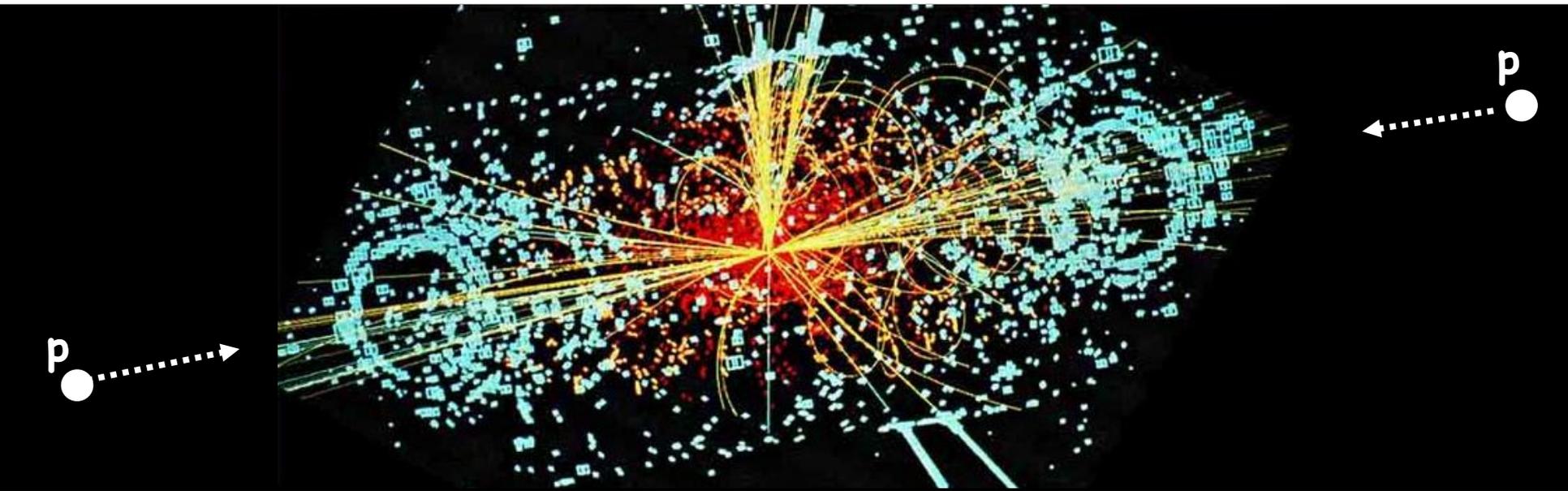


40 millions de croisements des faisceaux **par seconde**

1-20 collisions par croisement



$$\underline{E = m c^2}$$



Energie = masse + mouvement

$E = m c^2$
(théorie de la relativité)

nouvelles particules



ALICE

Masterclass 2015 - Nantes



Détection



Principe Général

Pour **reconstruire** le phénomène observé il faut **extraire des informations** des **particules produites**.

Or les particules ont une taille **trop petite** pour être observées au microscope

Nous savons qu'elles **existent** parce qu'elles **interagissent** (échange de l'énergie)

Idée:

Mettre de la **matière sur leur chemin**

Mesurer les **conséquences de leur passage**



Qu'est-ce qui caractérise une particule ?

- **Son état**

- Impulsion : $\vec{p} = \gamma m \vec{V}$ ($\vec{p} = m \vec{V}$) $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$

- Energie : $E = \gamma m c^2$ ($E = \frac{1}{2} m V^2$)

- Position : \vec{r}, t

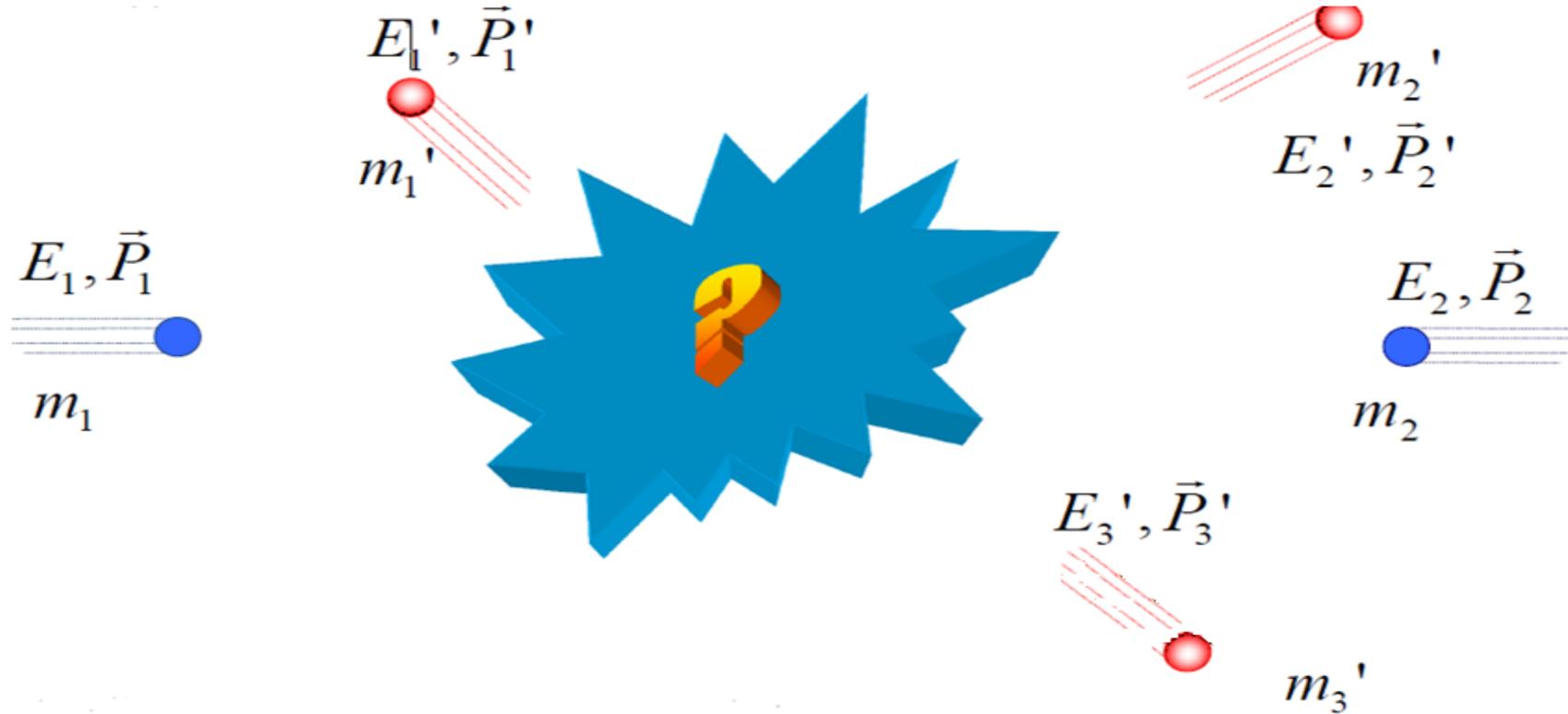
- Sa charge et autres nombres quantiques (spin, saveur, isospin ...)

- **Sa masse (identification)**



Que s'est-il passé ?

En supposant l'état initial connu, il reste à reconstruire l'ensemble des états finaux :



On utilise les lois de conservation ainsi que les paramètres de l'état initial pour reconstruire l'événement



Lois de conservation

On se base sur les lois de la physique pour reconstruire le puzzle :

- ❖ Energie/impulsion ou 4-moment :

on connaît : $\sum E_i = \sum E_f$ en relativité :

$$\sum \vec{P}_i = \sum \vec{P}_f \quad \vec{P} \cdot \vec{P} - E^2 = \text{invariant}$$

- ❖ Nombres quantiques :

Charge,

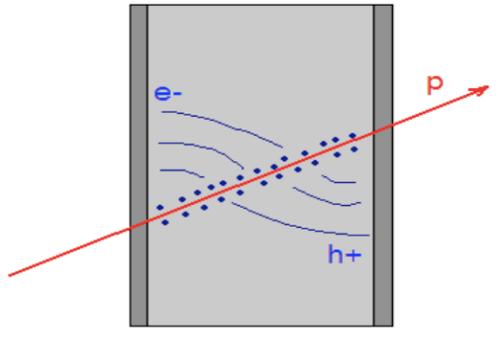
Nombres leptoniques, baryoniques ...

La parité, le spin ...

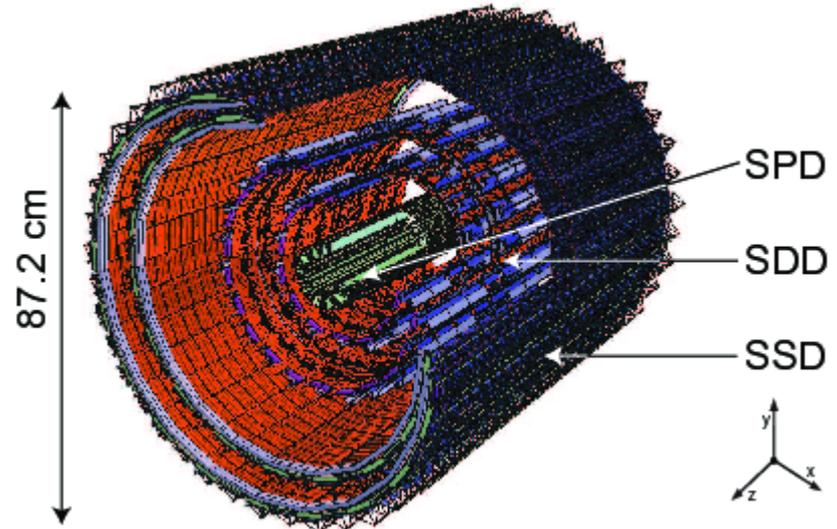


Mesure de la position

Un « Pixel »



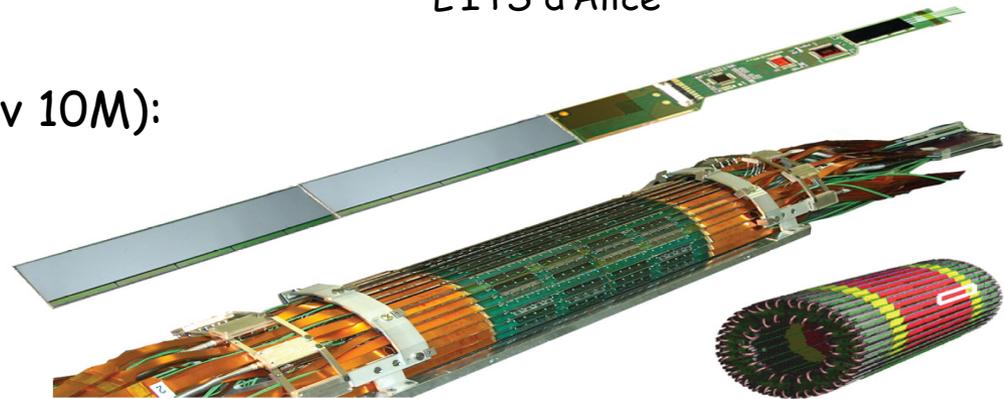
Ionisation (création d'un paire e-h, diffusion)
puis collection de la charge électrique créée



L'ITS d'Alice

Plusieurs Méga- pixel! (SPD: env 10M):

(détecteur de « vertex »):

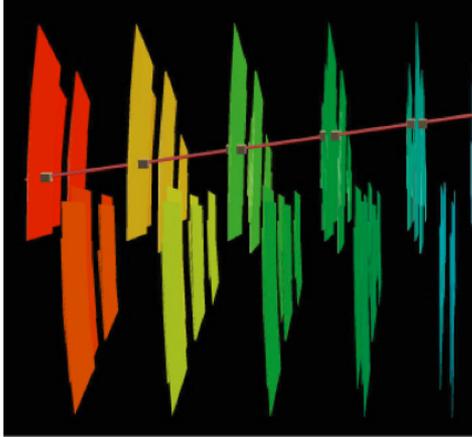


Le SPD d'Alice



Trajectomètre (interne)

Le principe de base

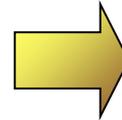


Le détecteur doit être:

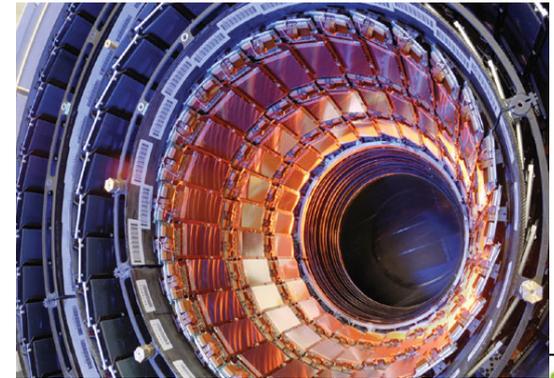
- **précis** (quelques microns) : granulaire
- **mince** (pour ne pas dévier les particules) : quelques 100ème de microns / couches
- **rapide**
- Résistant aux radiations (car proche du faisceau)
- Peu dissipatif (pour ne pas avoir à ajouter de matière)



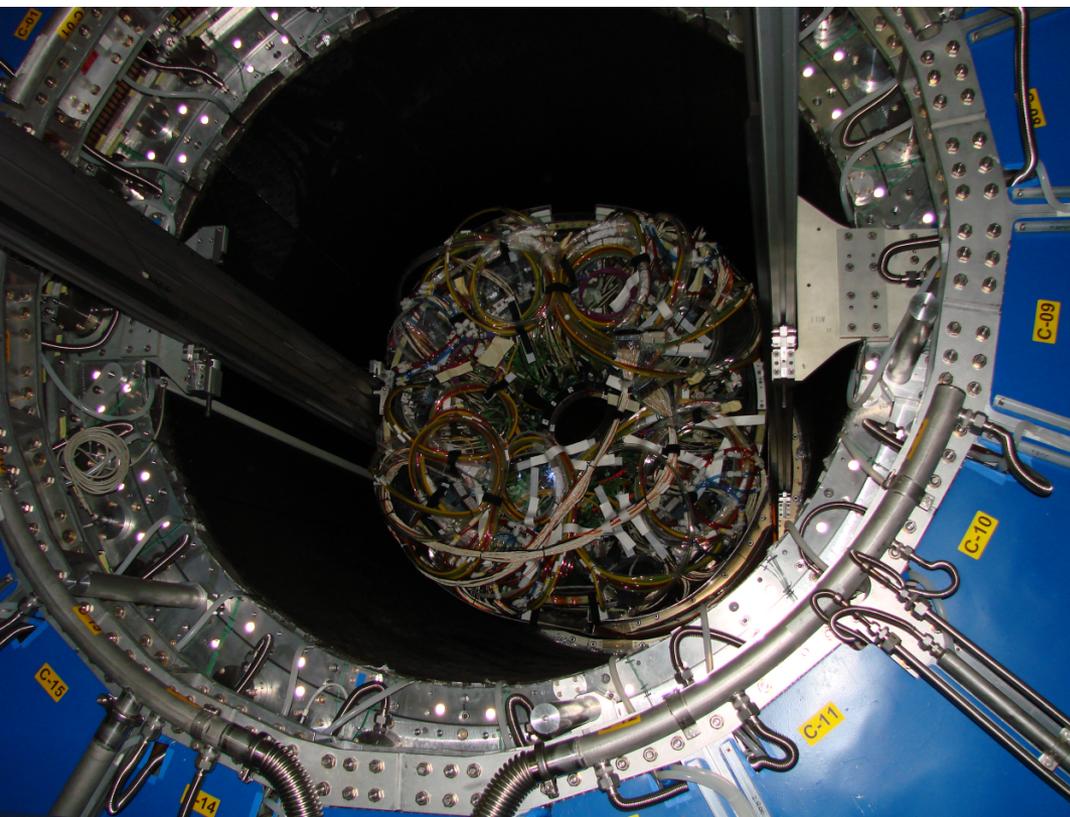
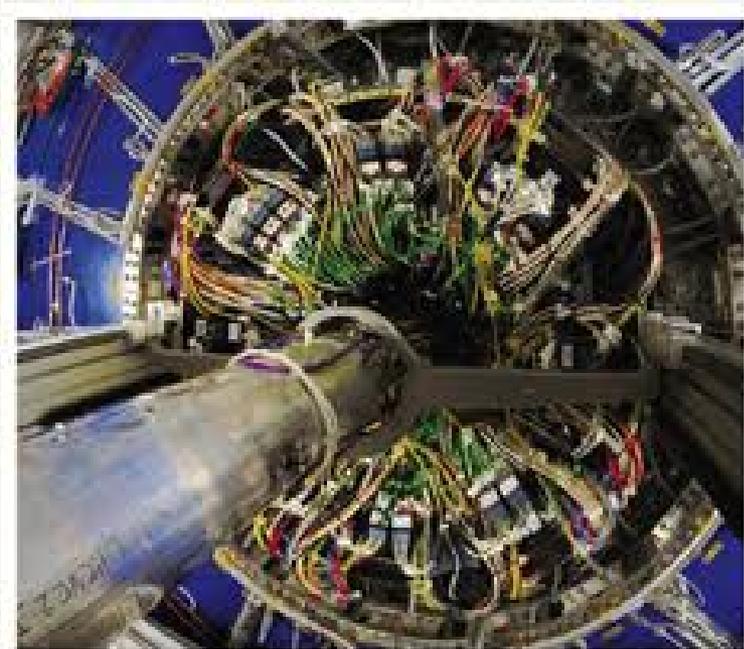
La « vraie » vie



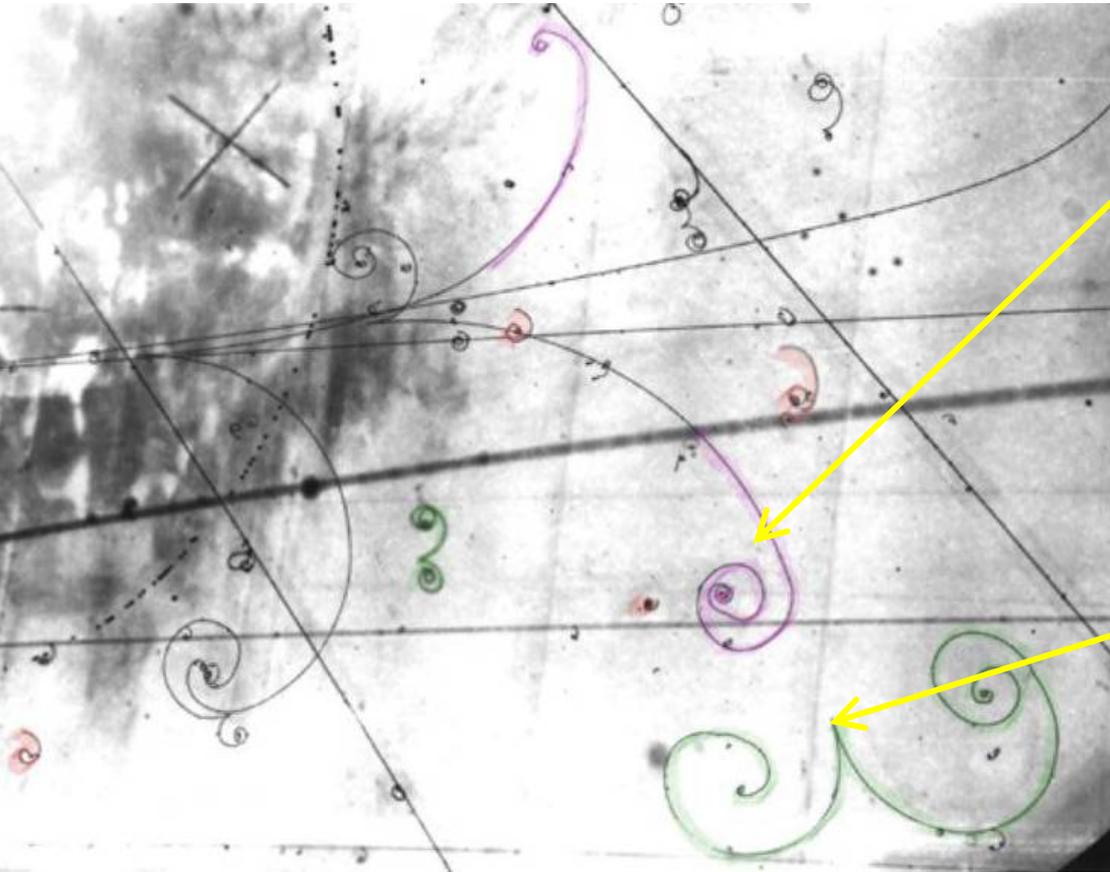
Détecteurs très segmentés
(→ très nombreux pixels)



ALICE



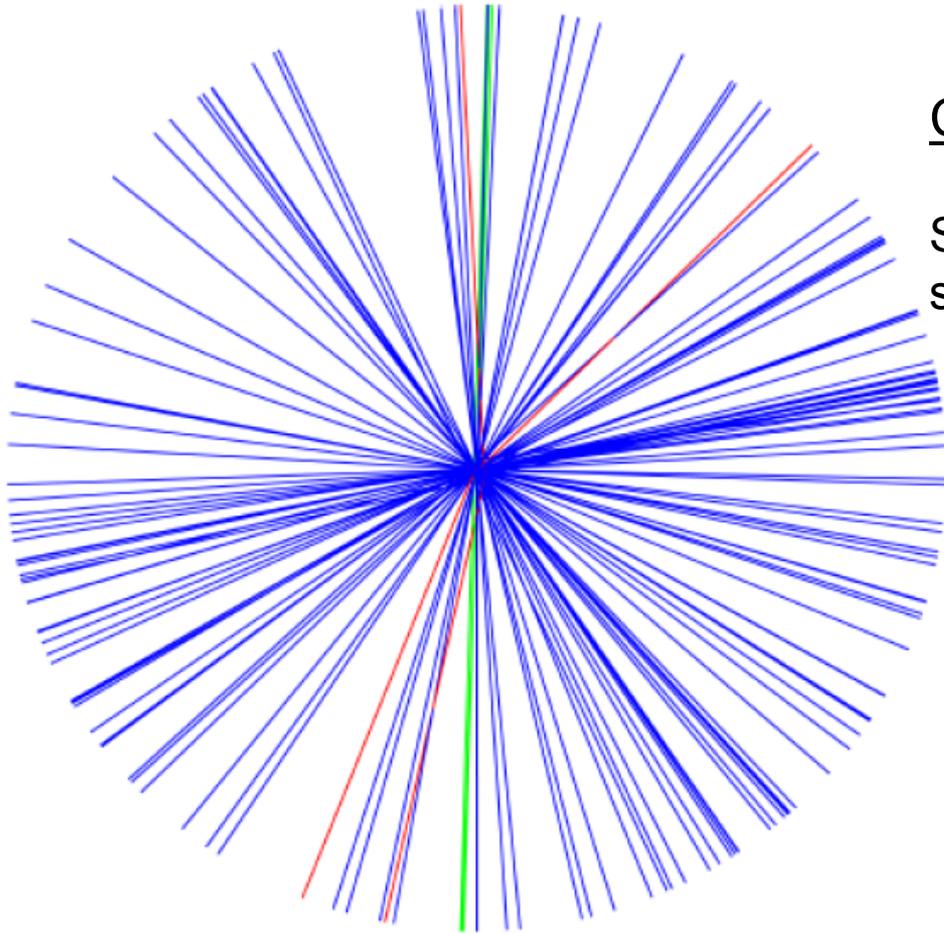
Le rôle du champ magnétique



Dans la chambre à bulle, les particules ralentissent et leurs trajectoires sont de plus en plus courbées.

Un photon produit un électron et un positron. Les charges sont opposées et donc les courbures aussi.

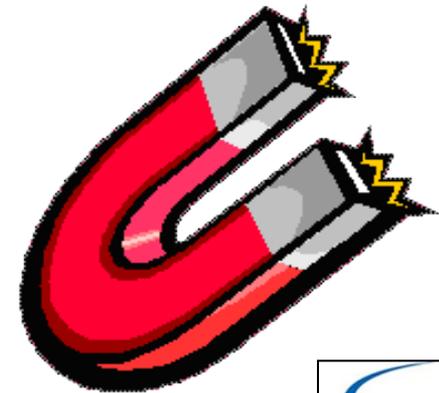
Détermination de l'impulsion P



Comment mesurer P ?

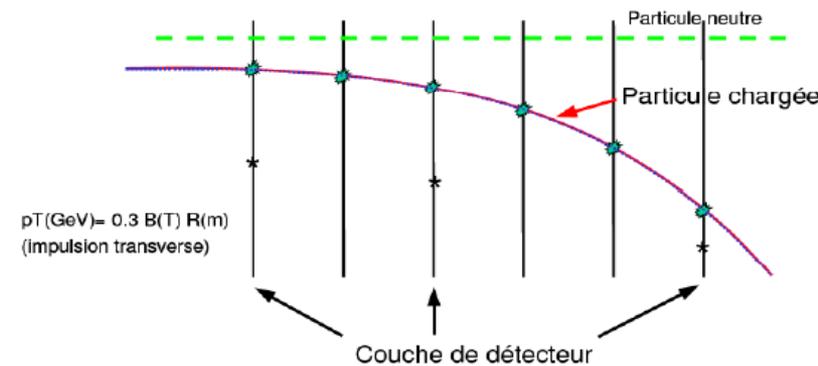
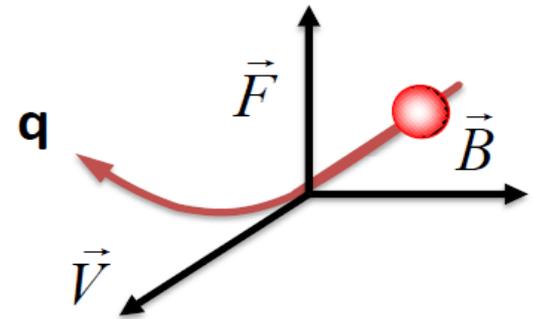
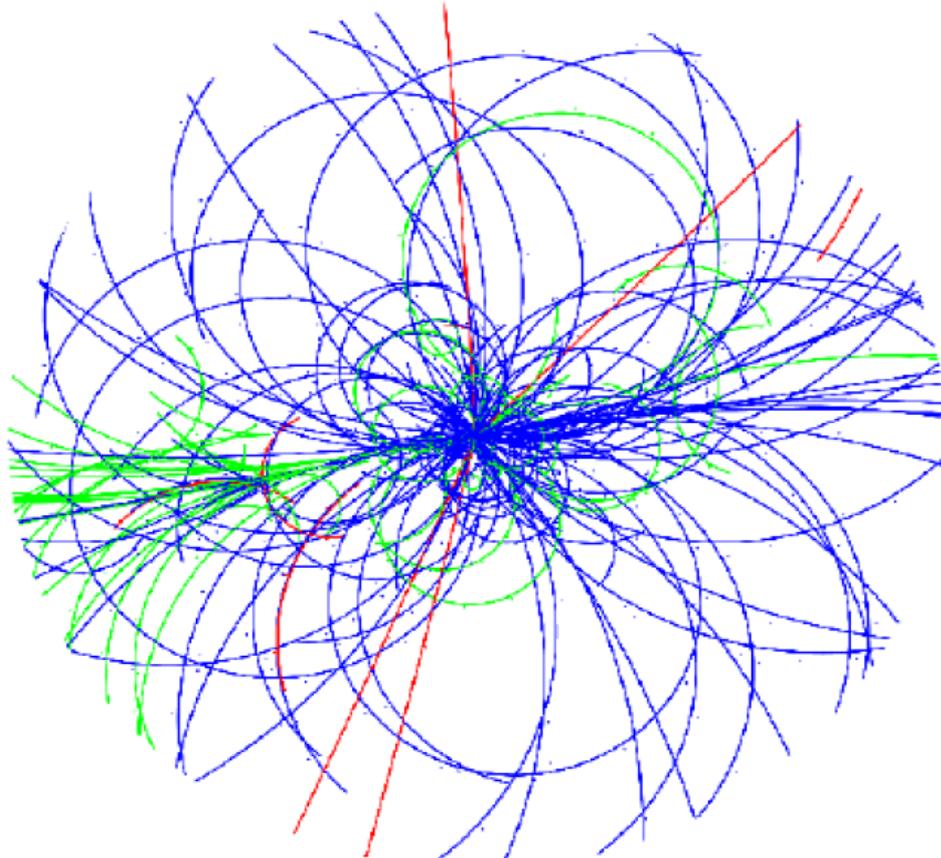
Sans champ magnétique, les trajectoires sont droites

Pour mesurer la charge et l'impulsion ($P=mv$), on va utiliser un aimant



Détermination de l'impulsion P

En présence d'un **champ magnétique**, les **particules chargées** ont une trajectoire en **forme de spirale** autour de la direction du champ.



Le champ magnétique courbe la trajectoire des particules chargées.

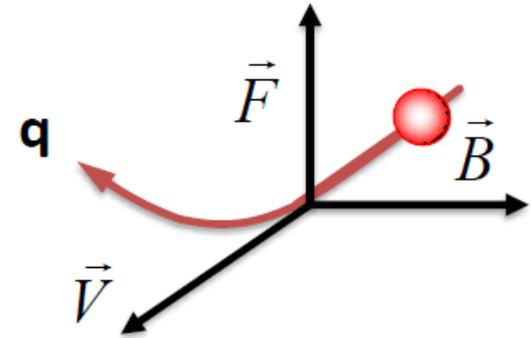


Détermination de l'impulsion P

Il faut reconstruire la trajectoire de la particule dans un **champ magnétique** :

Newton : $\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{V^2}{R} \vec{i}$

Maxwell : $\vec{F} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$

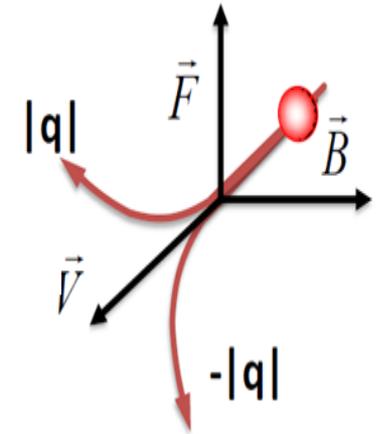


$$\Rightarrow R = \frac{mV}{qB} = \frac{P}{qB}$$

La courbure de la trajectoire donne une **mesure de l'impulsion**



Détermination de la charge (q)



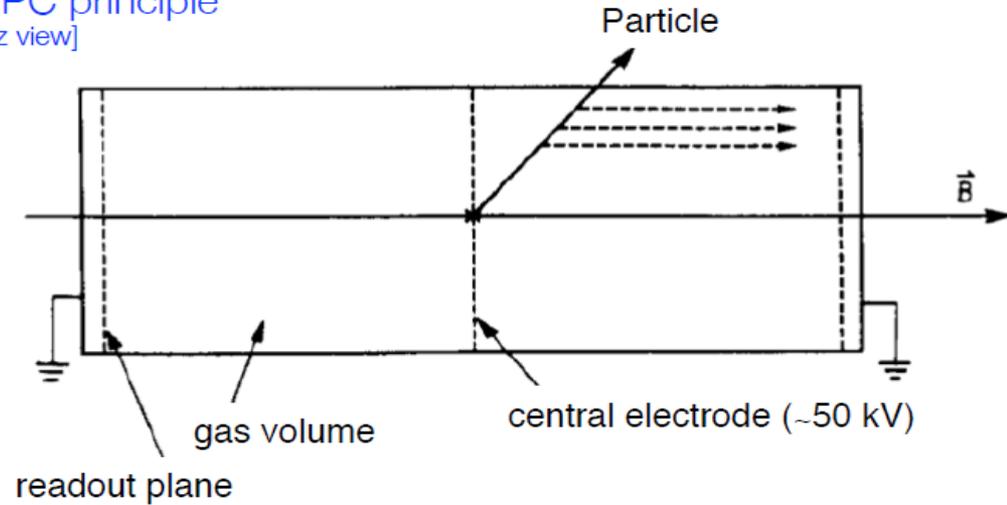
$$r \rightarrow p, q$$

→ La courbure dépend de la vitesse, de la masse et de la charge.

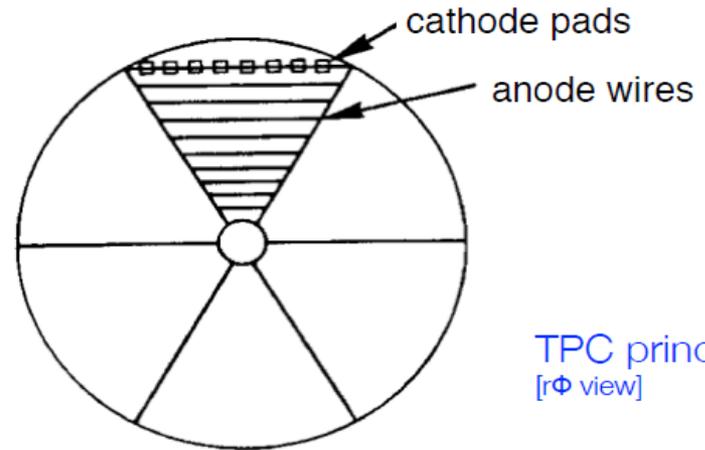


Principe d'une TPC

TPC principe
[rz view]

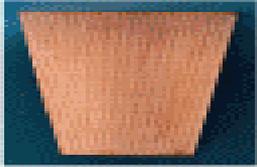


Détecteur cylindrique
Cathode centrale
Chambre proportionnelle multi-fils
(MWPC) à chaque bout du cylindre
Les électrons dérivent jusqu'aux MWPC
La distance de dérivation est grande



TPC principe
[r ϕ view]

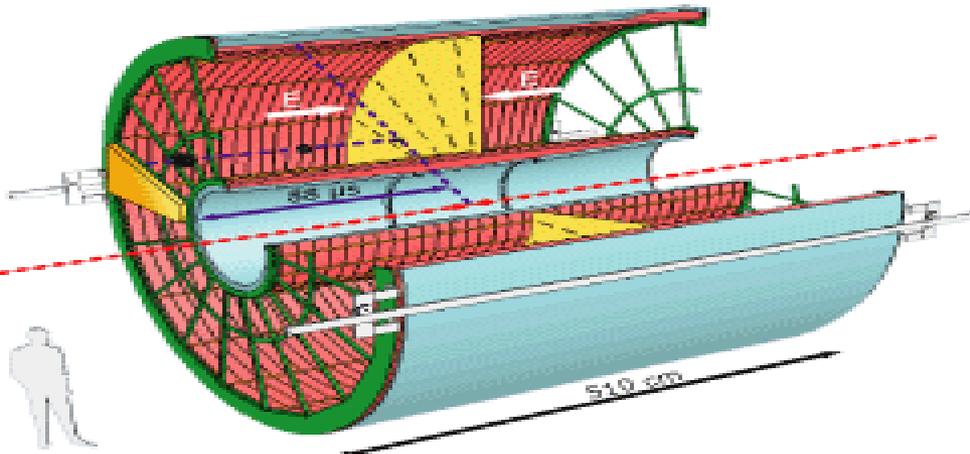




Readout Chambers



End Plate



GAS VOLUME: 88 m³
DRIFT GAS 90% Ne - 10% CO₂



HV electrode (100 kV)

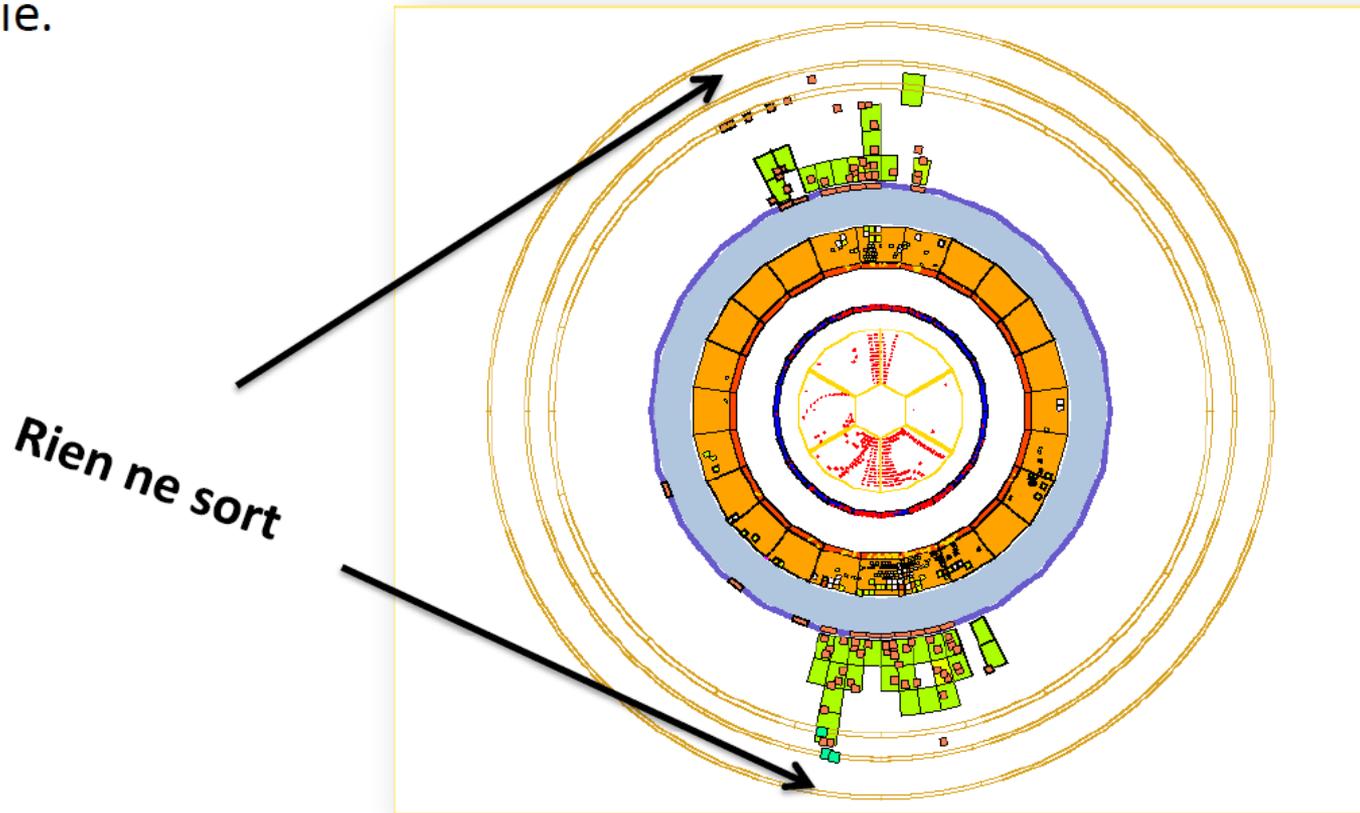


Field Cage



Détermination de E

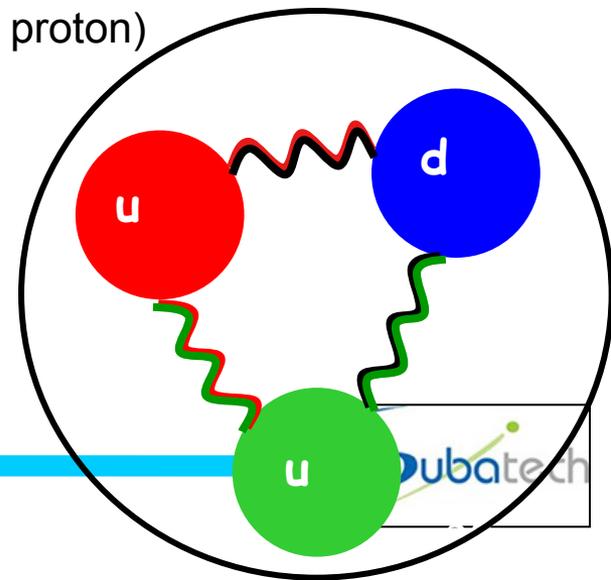
Il faut stopper la particule dans de la matière pour qu'elle dépose toute son énergie.



Pour mesurer l'énergie, on arrête la particule avec de la matière \Rightarrow détecteur dense (calorimètre)

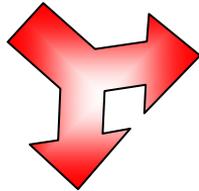
Fonctionnement d'un calorimètre

- Les particules interagissant avec les calorimètres peuvent être classées en **2 catégories**:
 - Particules électromagnétiques:
 - électrons et photons
 - Ces particules **interagissent beaucoup** → peu de matière suffit pour les arrêter
 - Les hadrons:
 - Hadrons: particules composites **faites de quarks** (ex: proton)
 - Ces particules interagissent moins
 - il faut **plus de matière** pour les arrêter

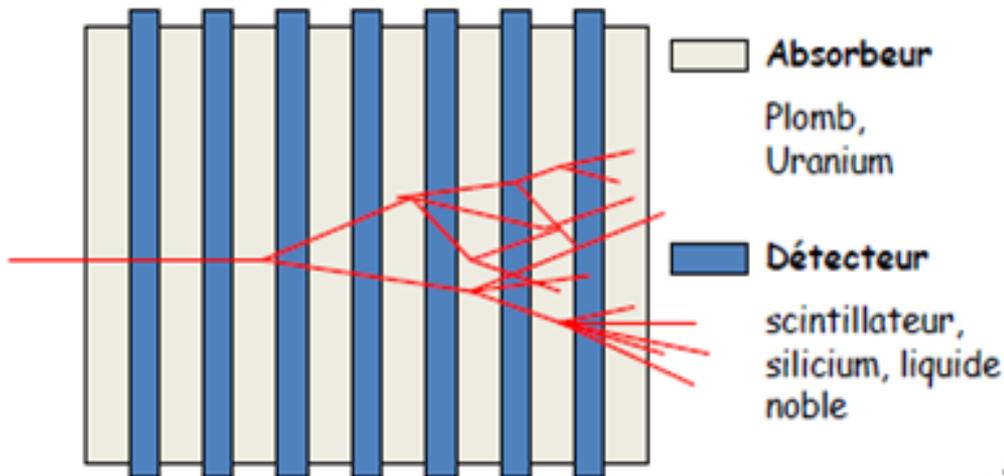
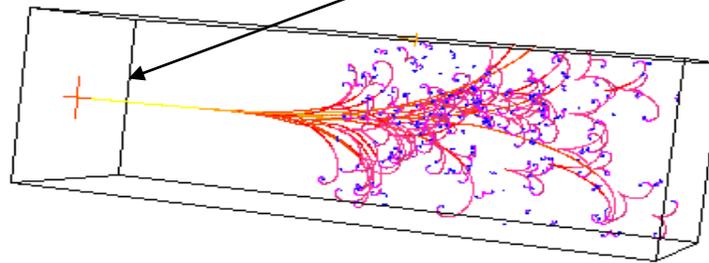


Calorimètre

Le principe de base :
arrêter la particule
ET mesurer un signal



Milieu dense ET transparent = cristal dopé au plomb



Segmentation obligatoire
pour séparer les particules

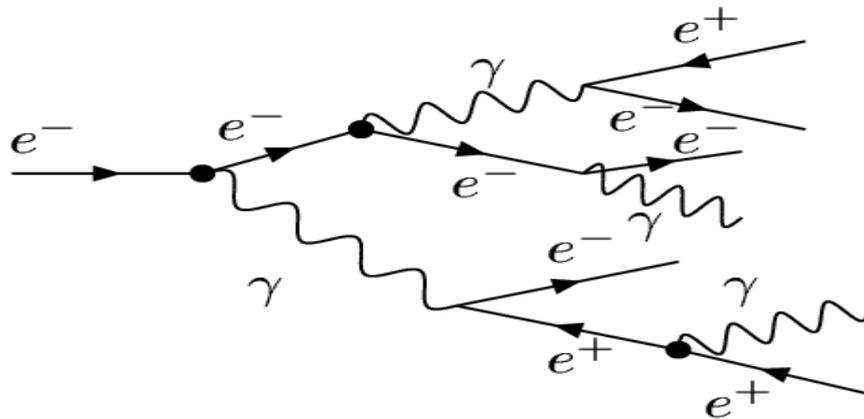


Gerbe électromagnétique

A haute énergie, les électrons perdent leurs énergies par **rayonnement de freinage** et les photons la perdent par **production de paires** :

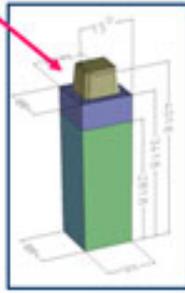
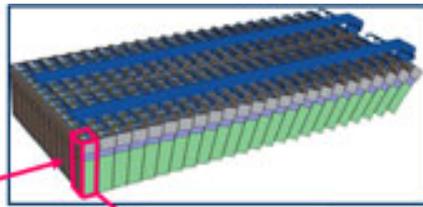
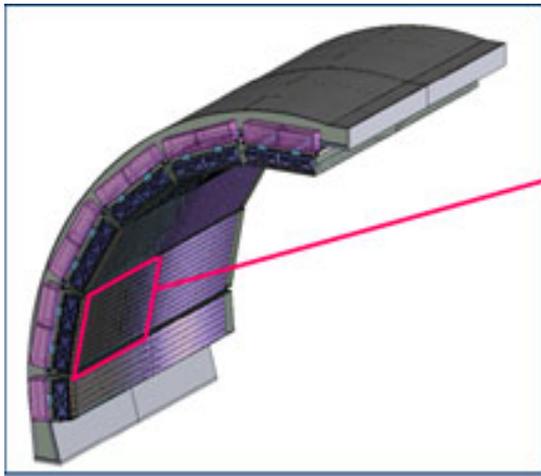
- Rayonnement de freinage : $e \rightarrow e + \gamma$
- Production de paires : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

- On a création d'une « **gerbe électromagnétique** » :



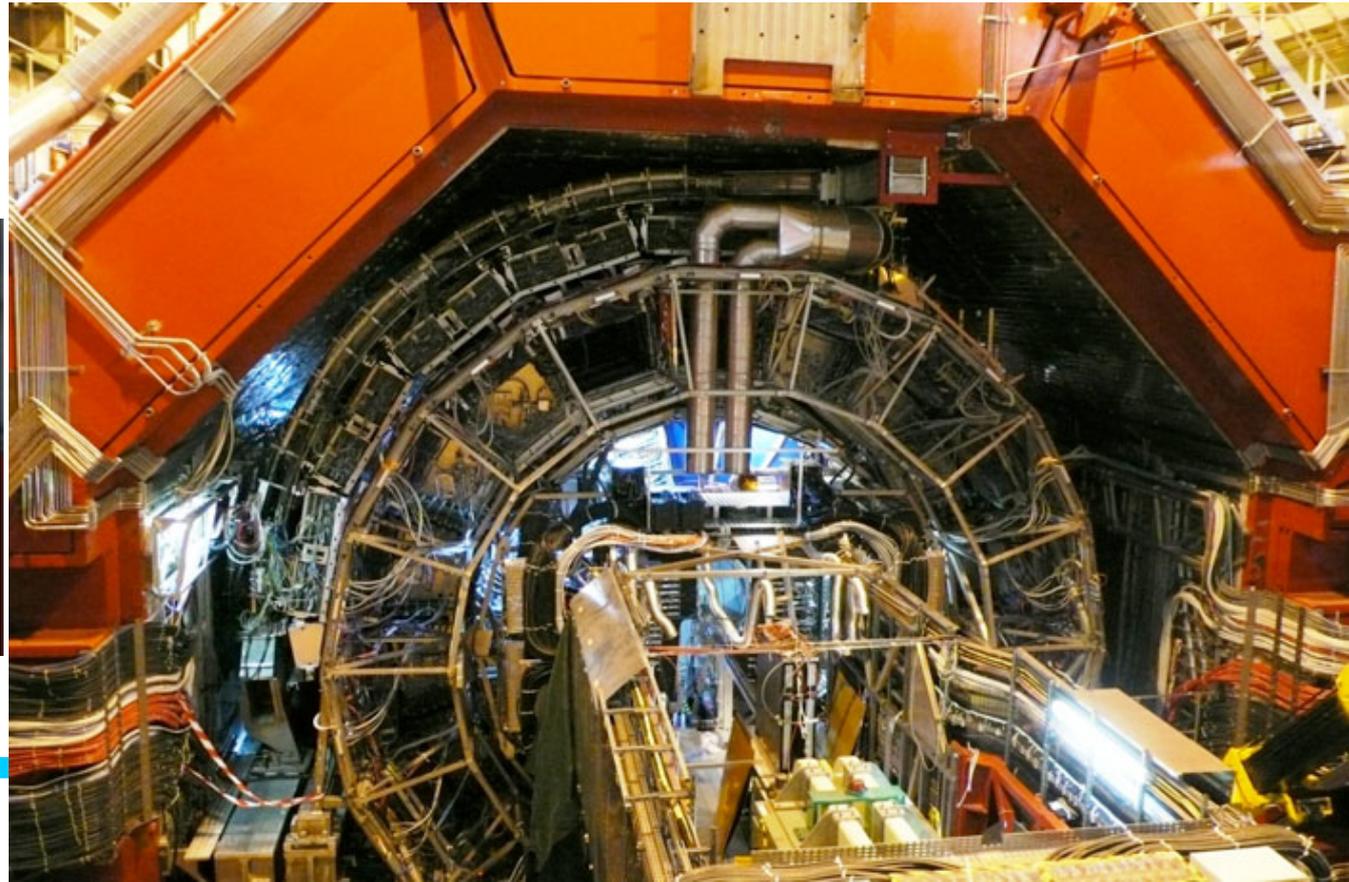
Les particules ainsi produites vont laisser un **signal** dans les parties **actives du calorimètre**





Calorimètre Electromagnétique à échantillonnage (“SHASHLIK” , Pb – scintillator).

Résolution en énergie: $11\%/\sqrt{E}$.

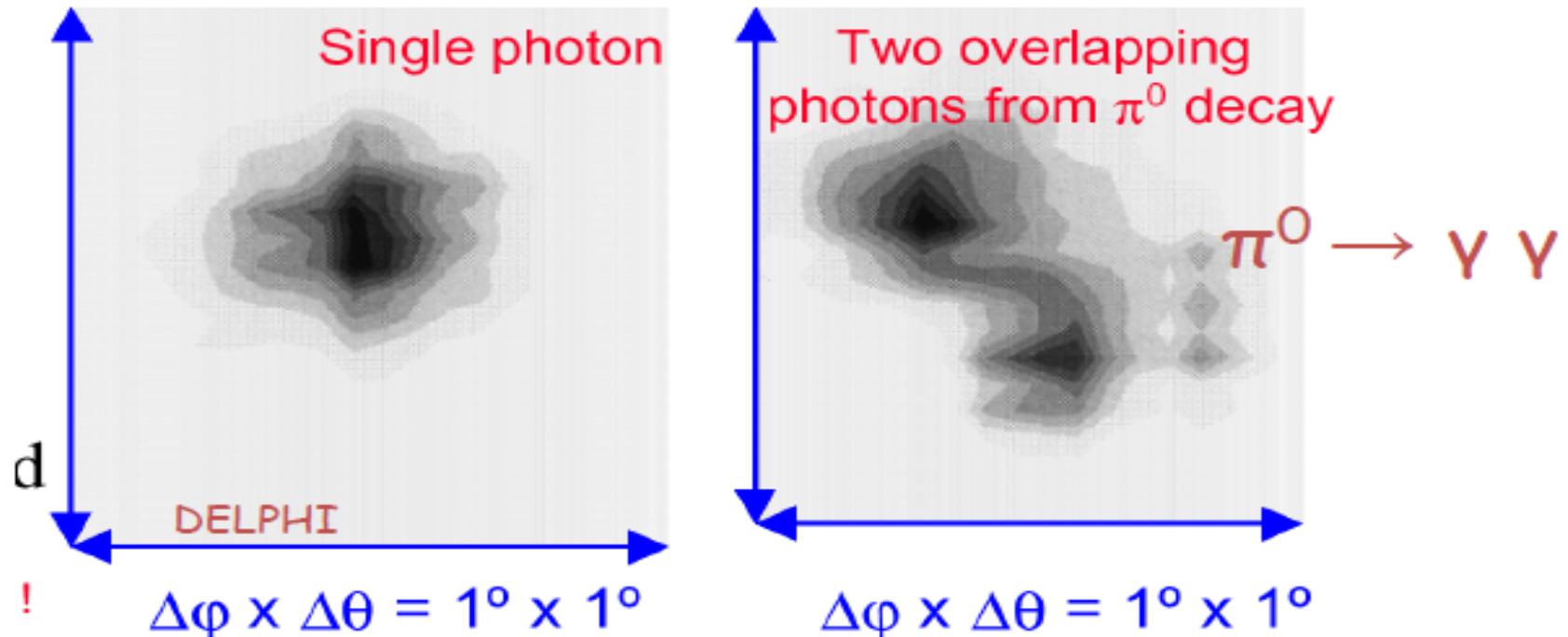


ALICE

Calorimétrie et Position

Avec une bonne granularité il est possible de distinguer les deux photons issus de la désintégration de π^0 .

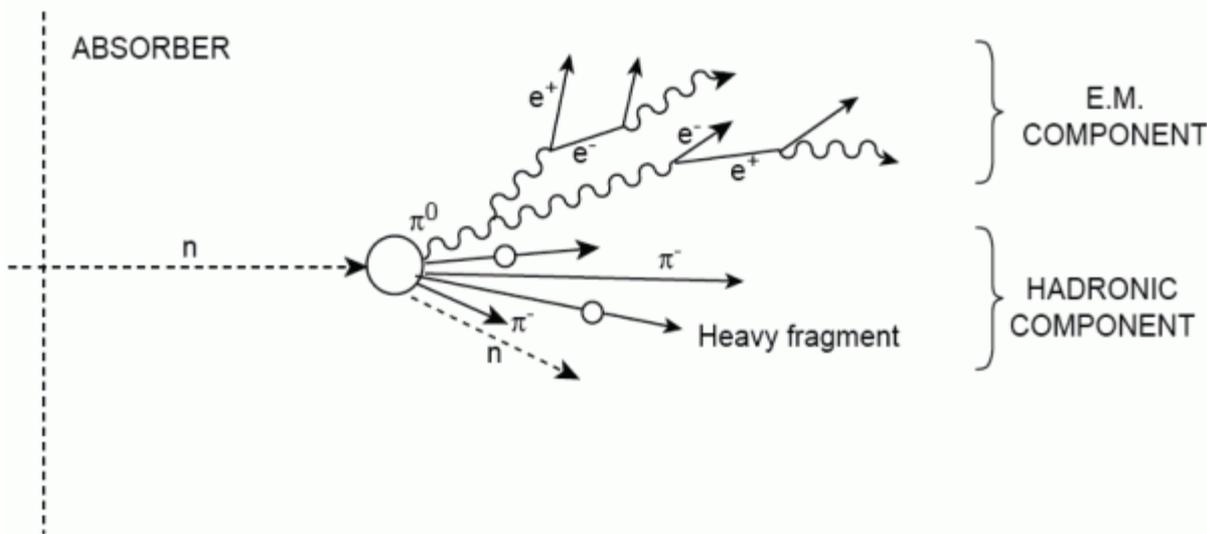
(A. Algeri et al. CERN-PPE/95-04)



Gerbe hadronique

Un hadron perd son énergie par **interaction nucléaire** avec les noyaux du milieu. La probabilité (section efficace) de ces processus est faible mais l'énergie perdue est forte. Les processus de perte d'énergie des hadrons dans la matière sont :

- ❖ La fragmentation du noyau cible.
- ❖ La perte d'énergie des produits de l'interaction par ionisation
- ❖ La production et la désintégration de π^0 en deux photons (induisant une composante électromagnétique à la gerbe).
- ❖ La production de neutrinos



Les hadrons sont plus lourds...

→ il faut plus de matière pour les arrêter on utilise un Calorimètre hadronique (il n'y en a pas dans ALICE)

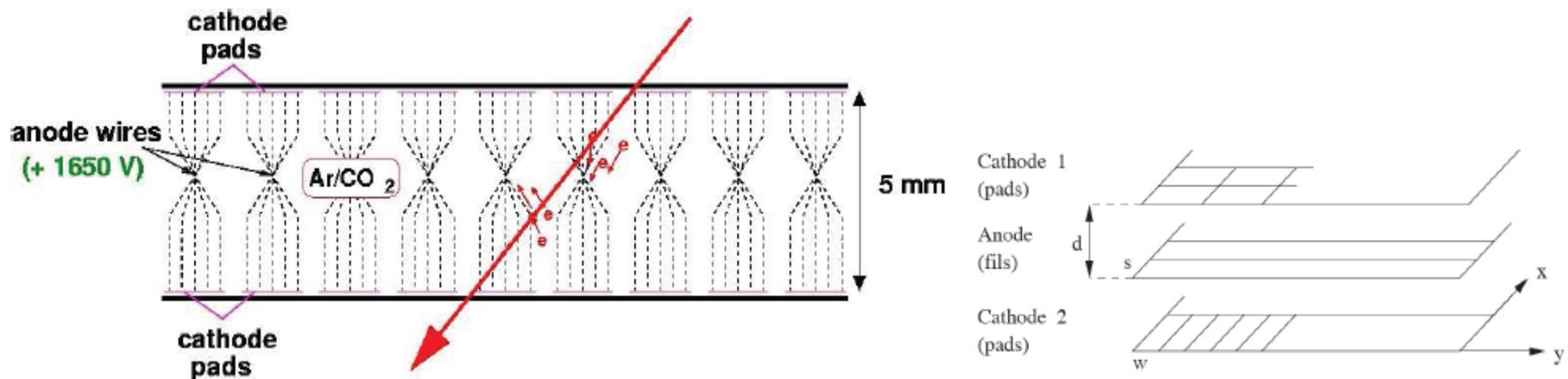
Celui de CMS:

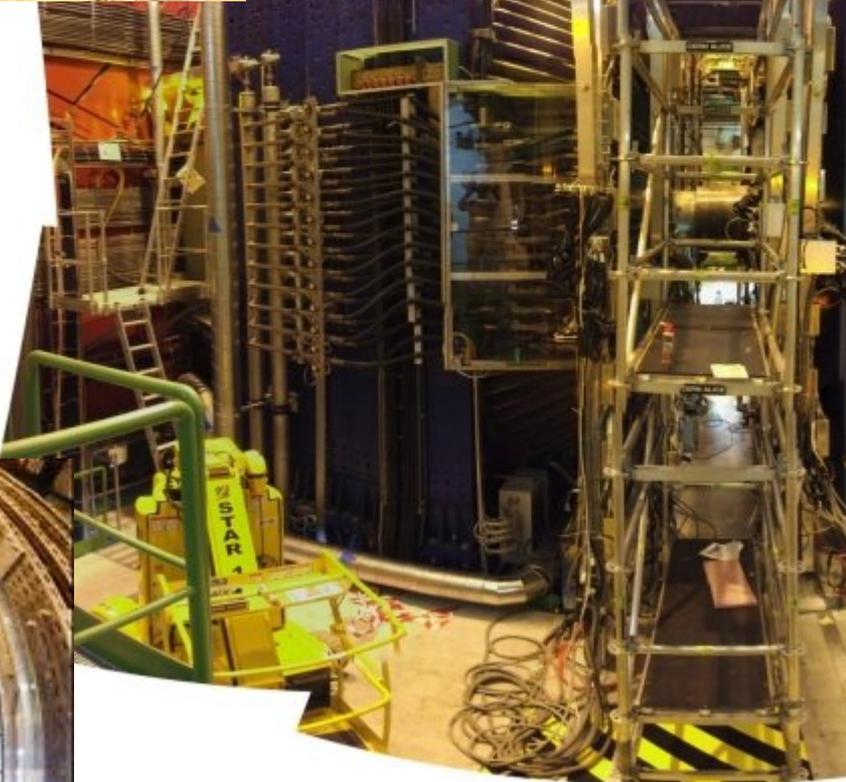


Principe d'un spectromètre à muon

- Les muons **interagissent très peu**... ils ne sont donc pas arrêtés par les calorimètres...

→ Spectromètre à muons





Détermination de la masse

- Lois de conservation (E,P)

$$m_0^2 c^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - \|\mathbf{P}\|^2$$

$$m_0^2 = E^2 - \|\mathbf{P}\|^2. \quad (\text{avec } c=1)$$

- Masse invariante :

$$\begin{aligned} M^2 &= (E_1 + E_2)^2 - \|\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2\|^2 \\ &= m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_2). \end{aligned}$$

→ **Identification** de la particule (voir exercice de cette après-midi)



Un assemblage logique



- Un aimant
- Des chambres à muons
- Un calorimètre hadronique
- Un calorimètre électromagnétique
- Trajectomètre

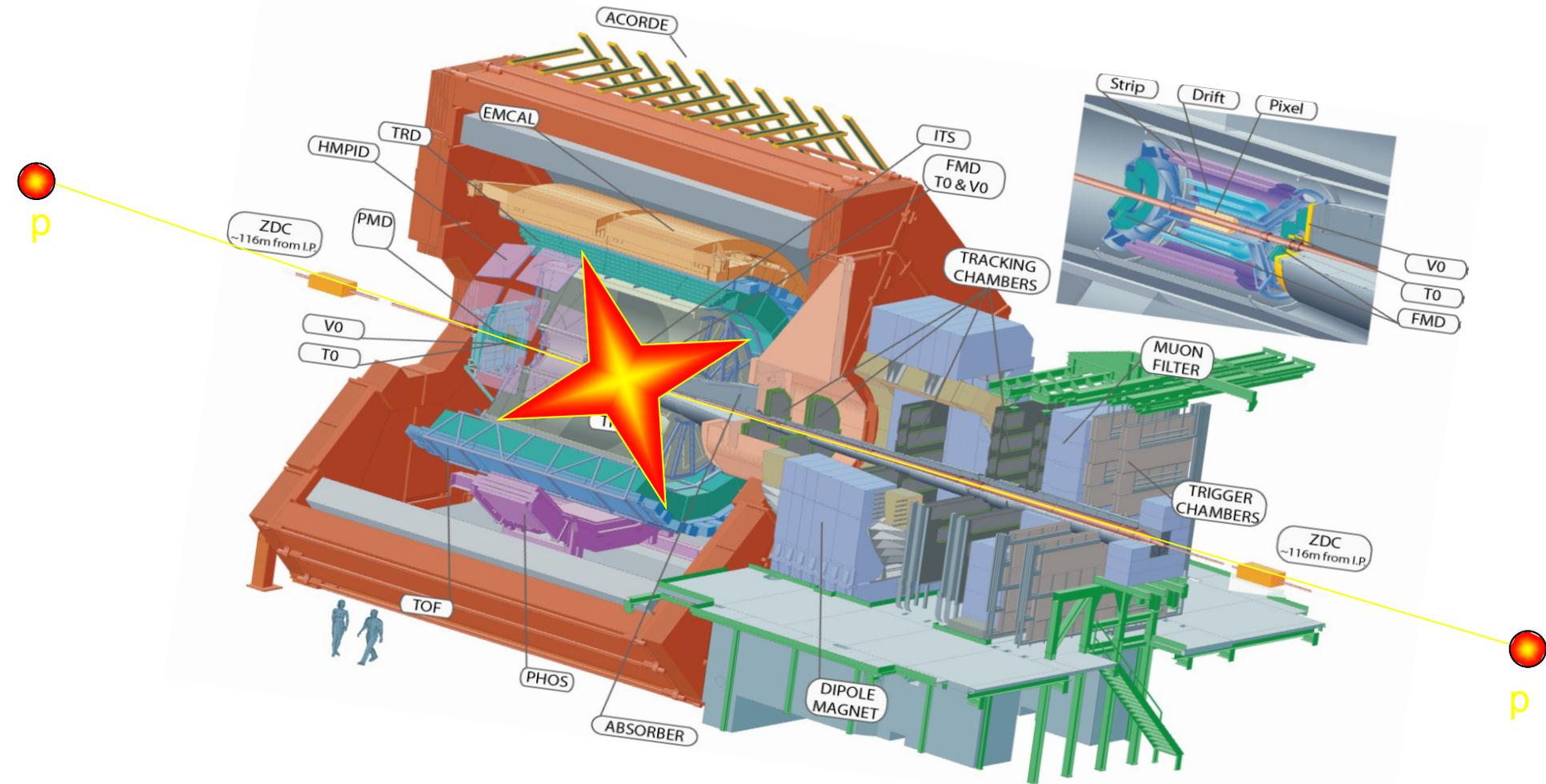


ALICE

Master

Un assemblage logique

Utiliser les symétries et fermer au maximum !



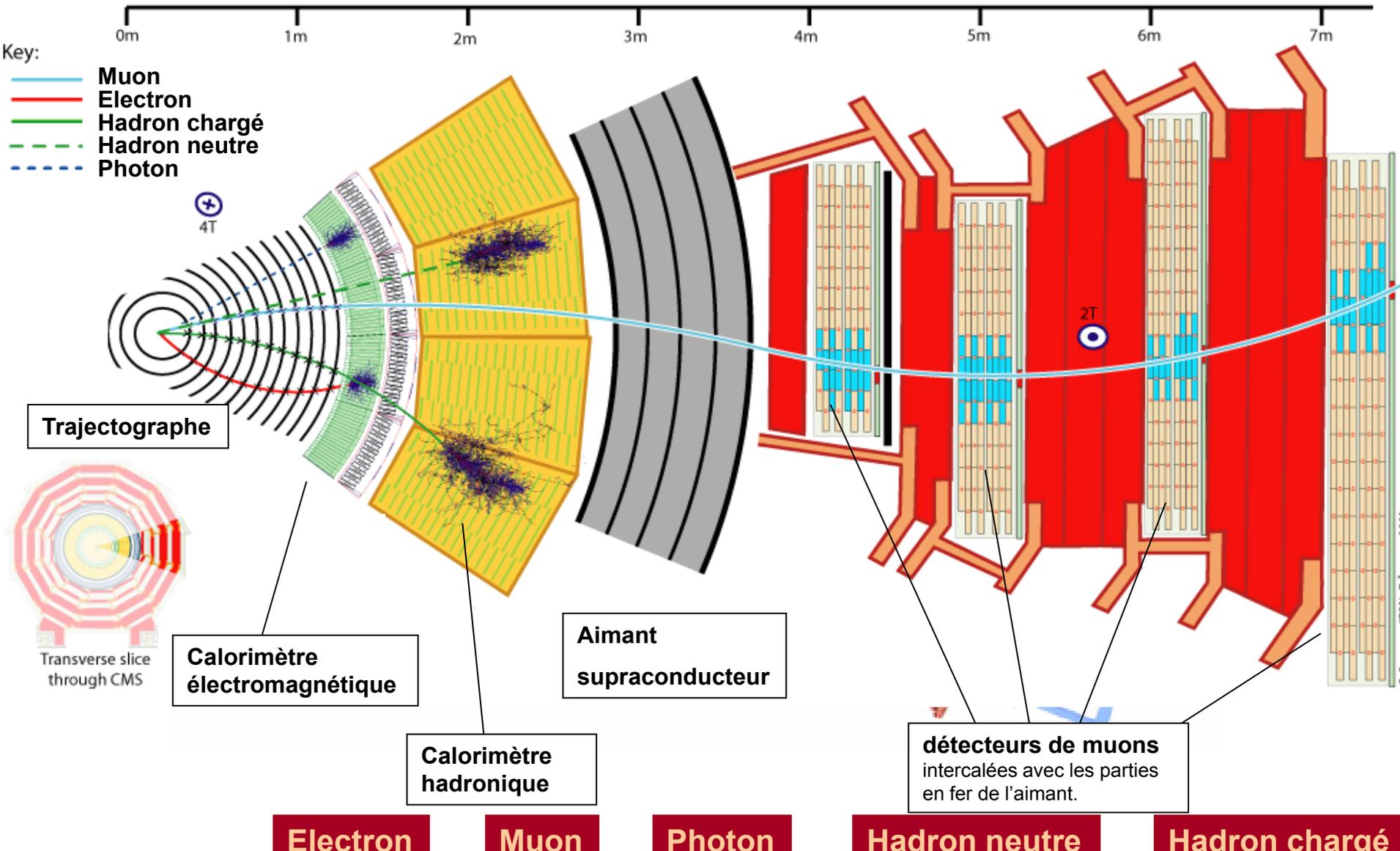
ALICE

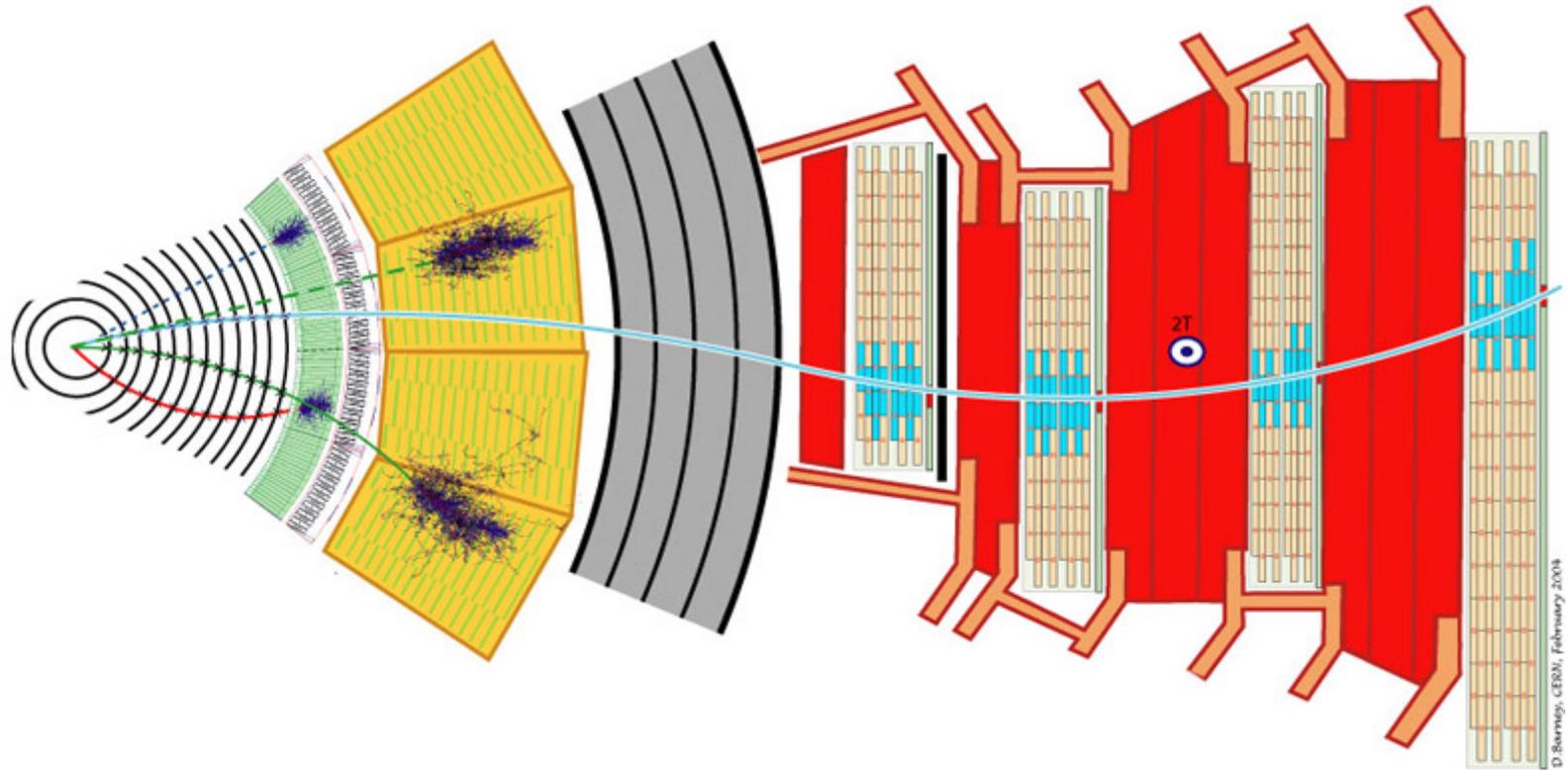
Masterclass 2015 - Nantes



Un assemblage logique

Utiliser les symétries et fermer au maximum !





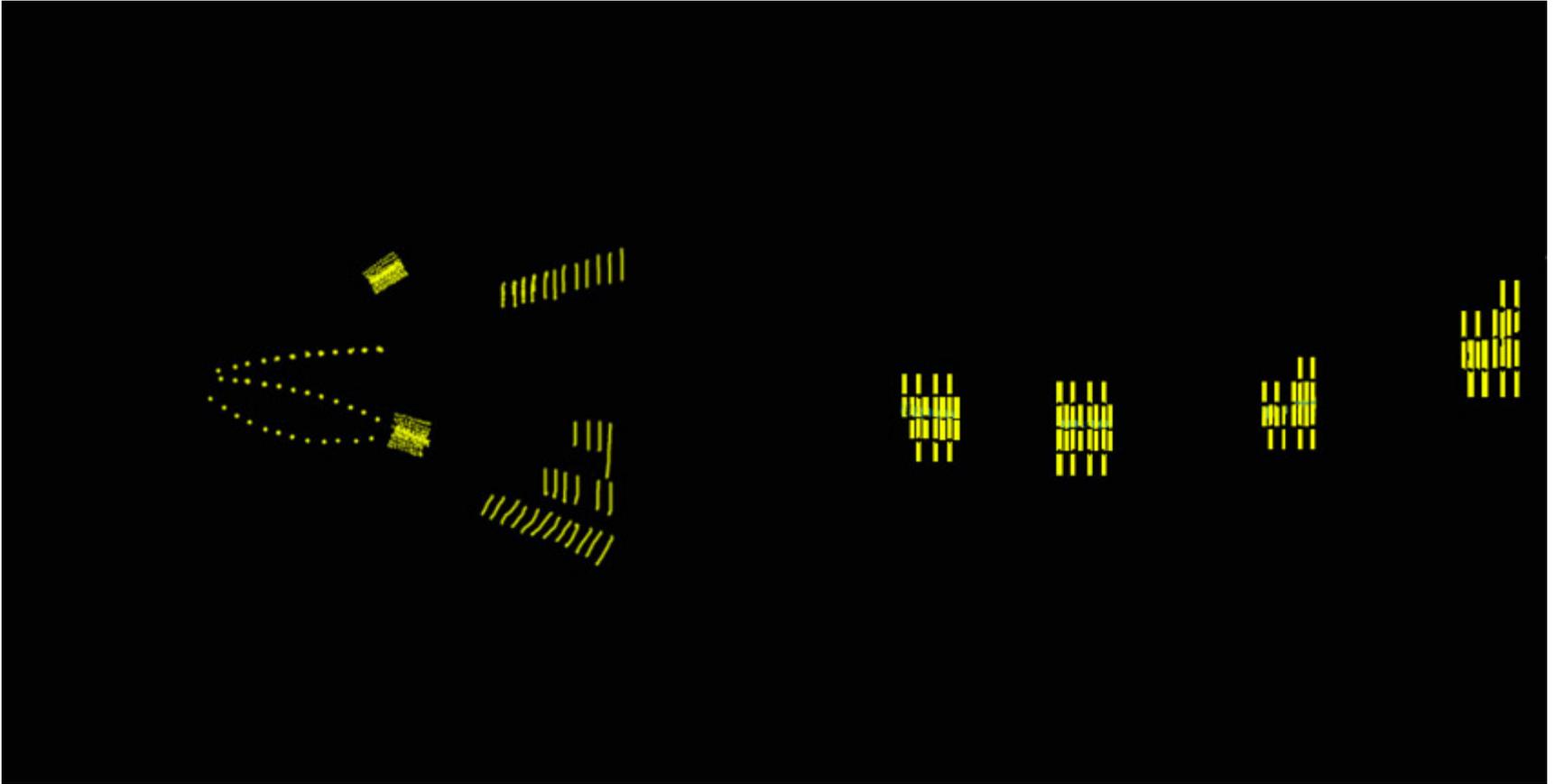
D. Barni, CERN, February 2008



ALICE

Masterclass 2015 - Nantes





Enregistrement et traitement des données



0001000011111000011100011 100000111000000011100000011111000
0011111101110 110101010100111001110010001100110 0010001100010
1000100101001010000110100100100010 0100010001000100010010001
000000000000 00001111100000000000000000111110101010101000000000
1001 0101111111111111111110000010010010001001000 100001010101
10101010 1010100010111111000001000100 01001100101001001000101
1000100010001000100 1000010010000100 010001000100010001001001
01001 00001000100010000100100010 0001000100010000100001000100
00000101111 100000010011101001110010 010001000100100010010010
10001011100 01111000100101111111111 001001000100101000100010
1111111 0011111000101010101 010101010101010101010101010101010
0000011100100100100011110 0010010010100010001001000 100101000
10001110010010010010010010001010101 0101010101010 11001111
0 0001110001 110011111001111110001010100101111100111001100100



Les données de l'expérience



Le détecteur



10 Mpx
1/2000 ème de sec.

~15Mpx
1/250 000 000 000 ème de sec.



2 Mo/sec

Le stockage des données



3 GB/sec



Les flux de données

À chaque seconde: **40 millions de collisions** entre les faisceaux

Chaque élément du détecteur **répond** : OUI ou NON

On veut enregistrer toutes les **réponses utiles**

On a donc un flux de données de **160 Go/sec**

→ Il faut réduire **3 Go / sec.....**

→ Il va falloir **sélectionner...**



Selections des données

Les "triggers":

Répondre à des questions "simples":



- Est-ce que la photo est floue ?
- Est-ce qu'il y a ce qu'il faut sur la photo ?
- Est-ce que la photo est bien cadrée ?



- Électron visible ?
- Muon visible ?
- Énergie déposée bien mesurée ?
- Pas d'éléments manquants ?
- Possible d'analyser plus tard ?
- ...

→ On réduit le flot de données à 3 GB/s.

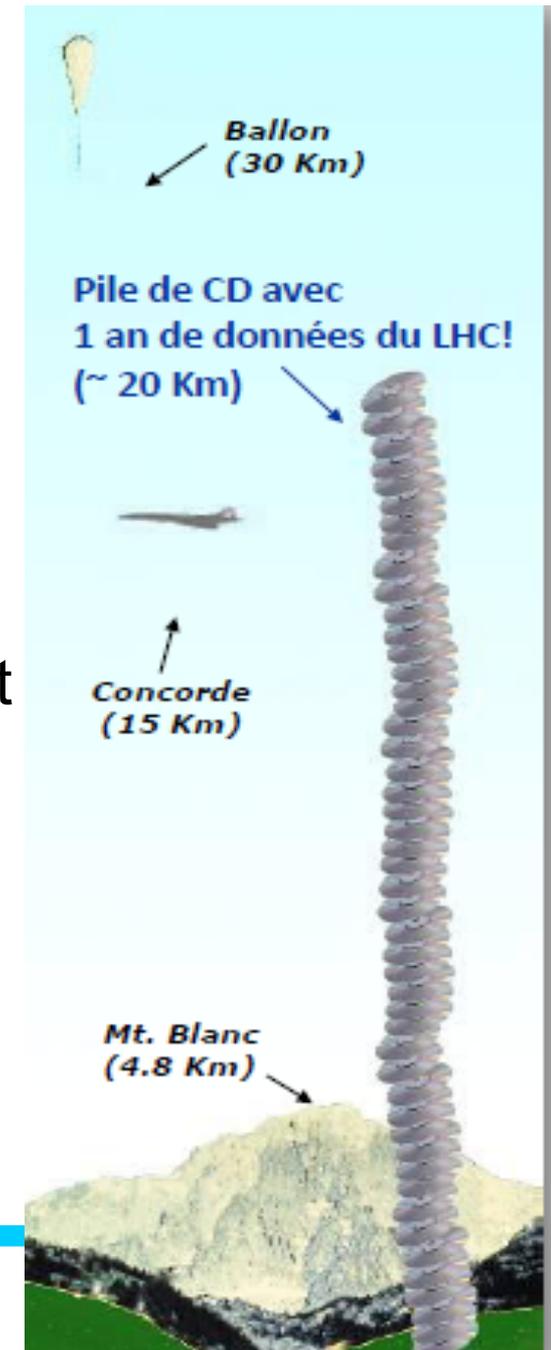


ALICE

LA PROBLÉMATIQUE

Il y a 4 expériences après du LHC du CERN
Production **de 30 To par jour** soit 42 000 CD
par jour
et **40 Po/an** (1% du volume d'information
produit par l'homme

→ Un ordinateur ne suffit pas pour les traiter et
les stocker.



ALICE

Analyse des données

C'est votre travail de cet après-midi!



ALICE

Masterclass 2015 - Nantes

49

