

Détecteurs auprès des collisionneurs

Elisabeth Petit
CPPM



École de la Physique au Détecteur 2024

Fréjus, 24-29 novembre 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

Introduction et rappels

- ◆ Le LHC est accélérateur de particules le plus puissant au monde
 - énergie dans le centre de masse de 13 TeV
 - une collision toutes les 25 ns
- ◆ On veut étudier des particules qui se désintègrent instantanément
⇒ mesurer leurs produits finaux de désintégration pour remonter à l'événement initial
- ◆ Seules particules que l'on peut "voir" dans nos détecteurs :
 - électrons
 - photons
 - muons
 - jets
 - protons
 - neutrons

Généralités

Trajectographes

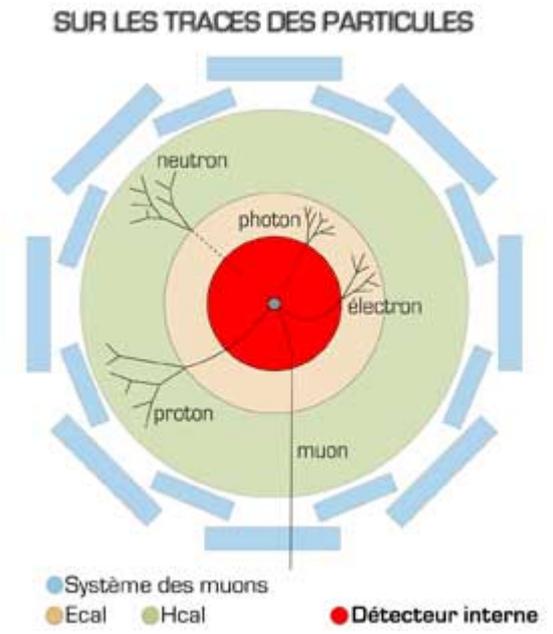
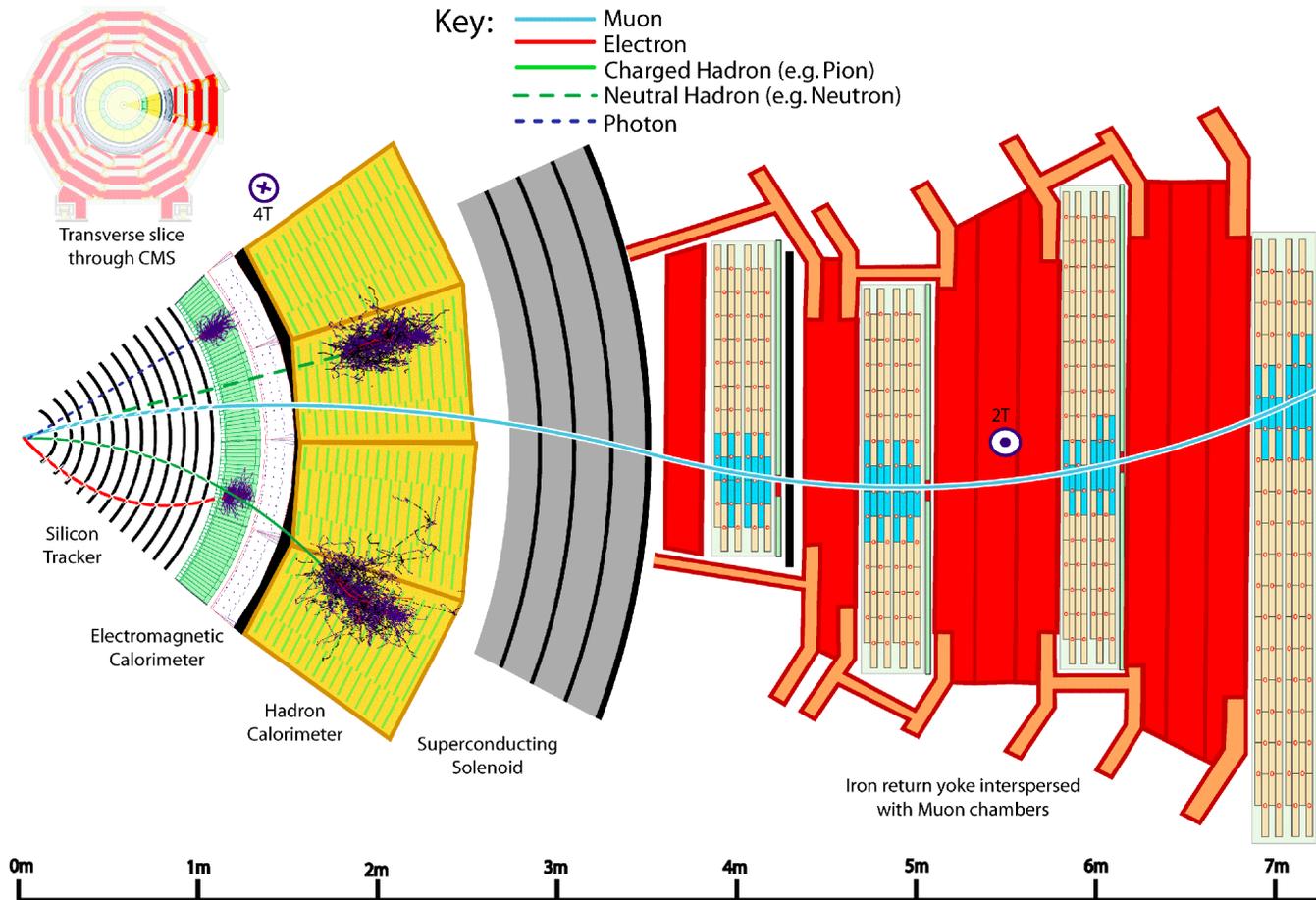
Calorimètres

Contraintes des détecteurs auprès du LHC

- ◆ **Tous types** de particules, dans toutes les directions, dans une grande gamme d'énergie (de qqs GeV à plusieurs TeV)
 - *réponse* : couches de détecteurs dédiés en oignon autour de la collision, et s'approcher le plus possible du faisceau (“acceptance”)
- ◆ Les particules **perdent de l'énergie** à chaque couche de détecteur
 - *réponse* : minimiser la matière dans les couches internes
- ◆ Un croisement de faisceau tous les **25 ns (40 MHz)**
 - *réponse* : taux d'acquisition élevé et détecteurs rapides
- ◆ Plusieurs collisions par croisement de faisceaux (**empilement**)
 - *réponse* : beaucoup de canaux, numérisation ingénieuse
- ◆ Beaucoup de **radiations** : fin du LHC : 1.5 MGy dans la partie centrale (dose létale pour l'homme)
 - *réponse* : matériaux et électronique résistants aux radiations, peu activables
- ◆ Expériences qui durent des dizaines d'années, certaines parties peu/pas accessibles

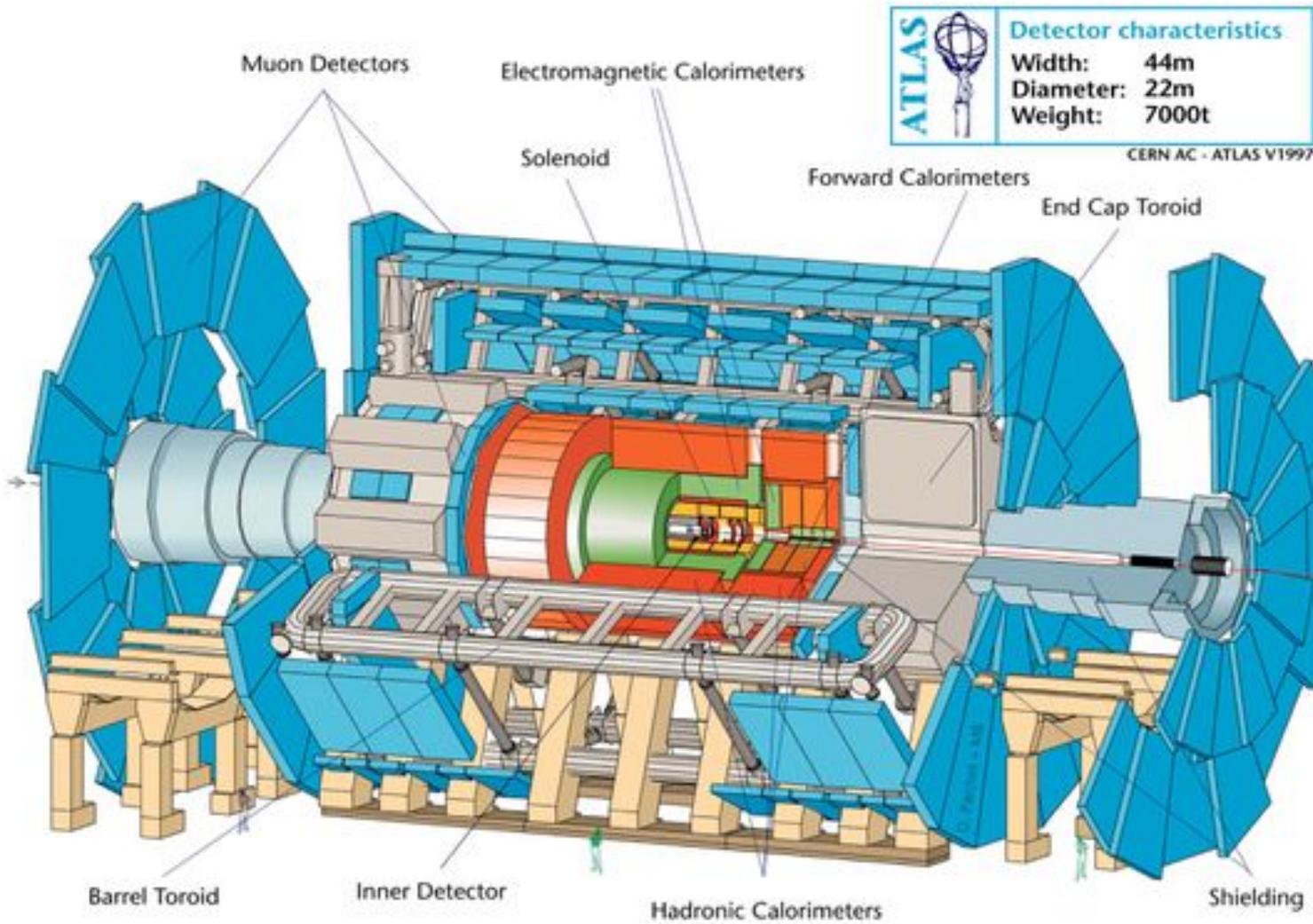
Principe

◆ Un oignon de 7000t



ATLAS

◆ Détecteur généraliste



◆ 3000 scientifiques, 38 pays



◆ Détecteur généraliste

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
 Overall diameter : 15.0 m
 Overall length : 28.7 m
 Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
 12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
 Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 1\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
 Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
 Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

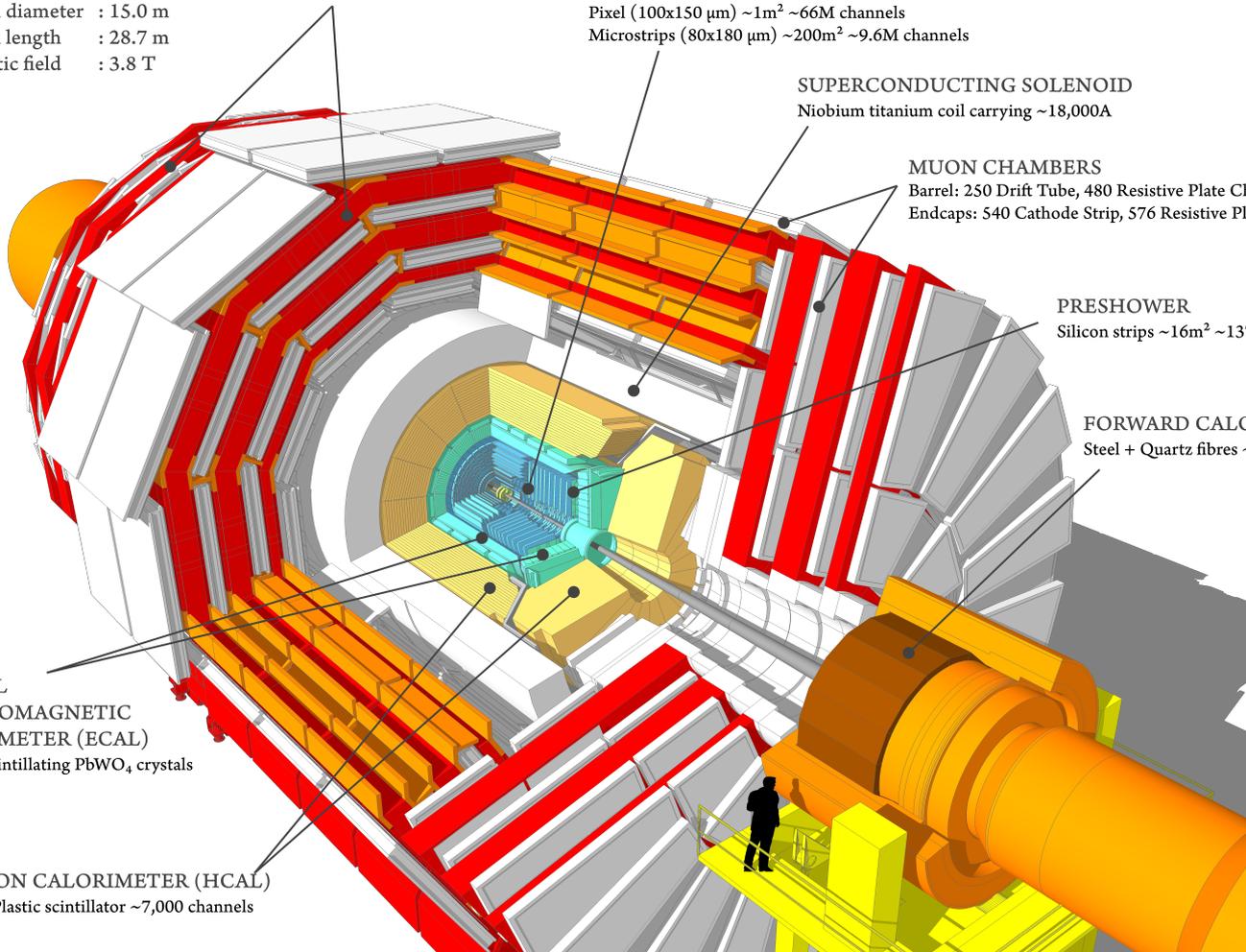
MUON CHAMBERS
 Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
 Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
 Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER
 Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
 ELECTROMAGNETIC
 CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

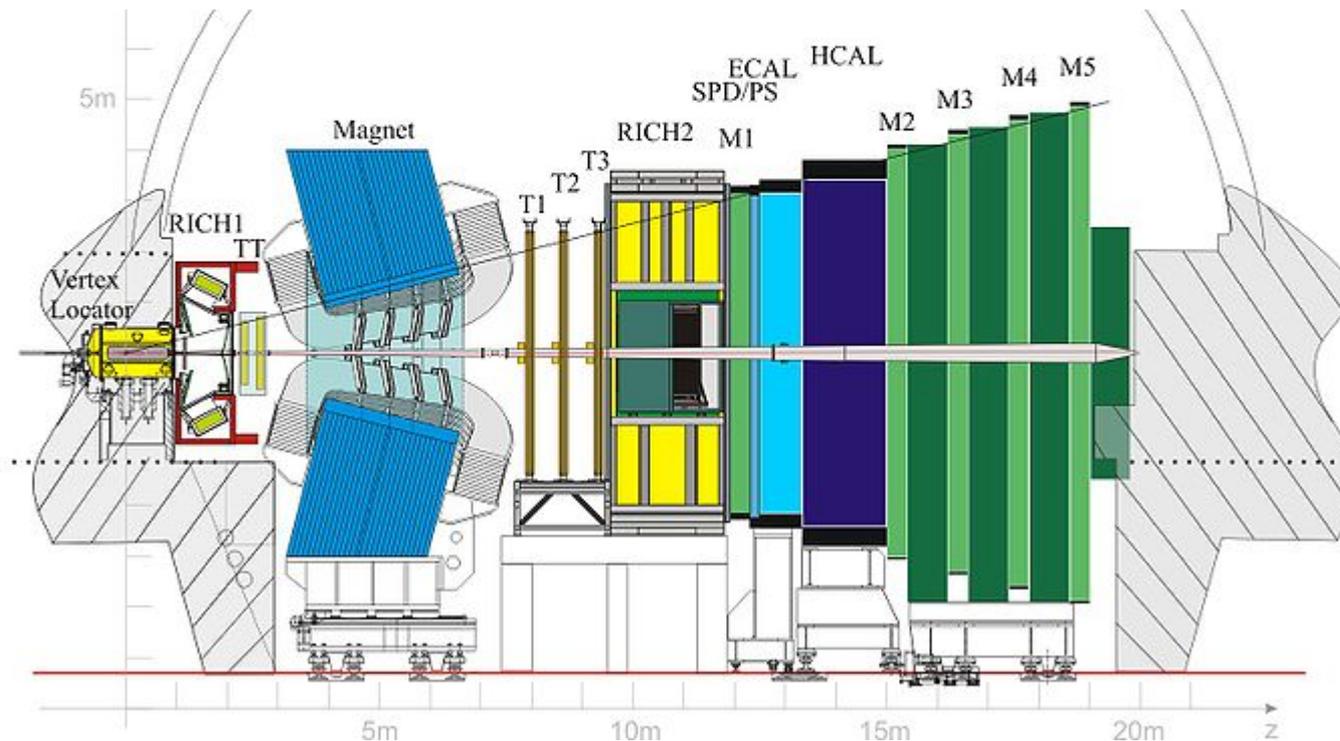
HADRON CALORIMETER (HCAL)
 Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



◆ 3000 scientifiques

LHCb

- ◆ Étudie les mésons B, pour comprendre les différences entre matière et anti-matière
 - particules volent le long de la ligne de faisceau \Rightarrow détecteur asymétrique



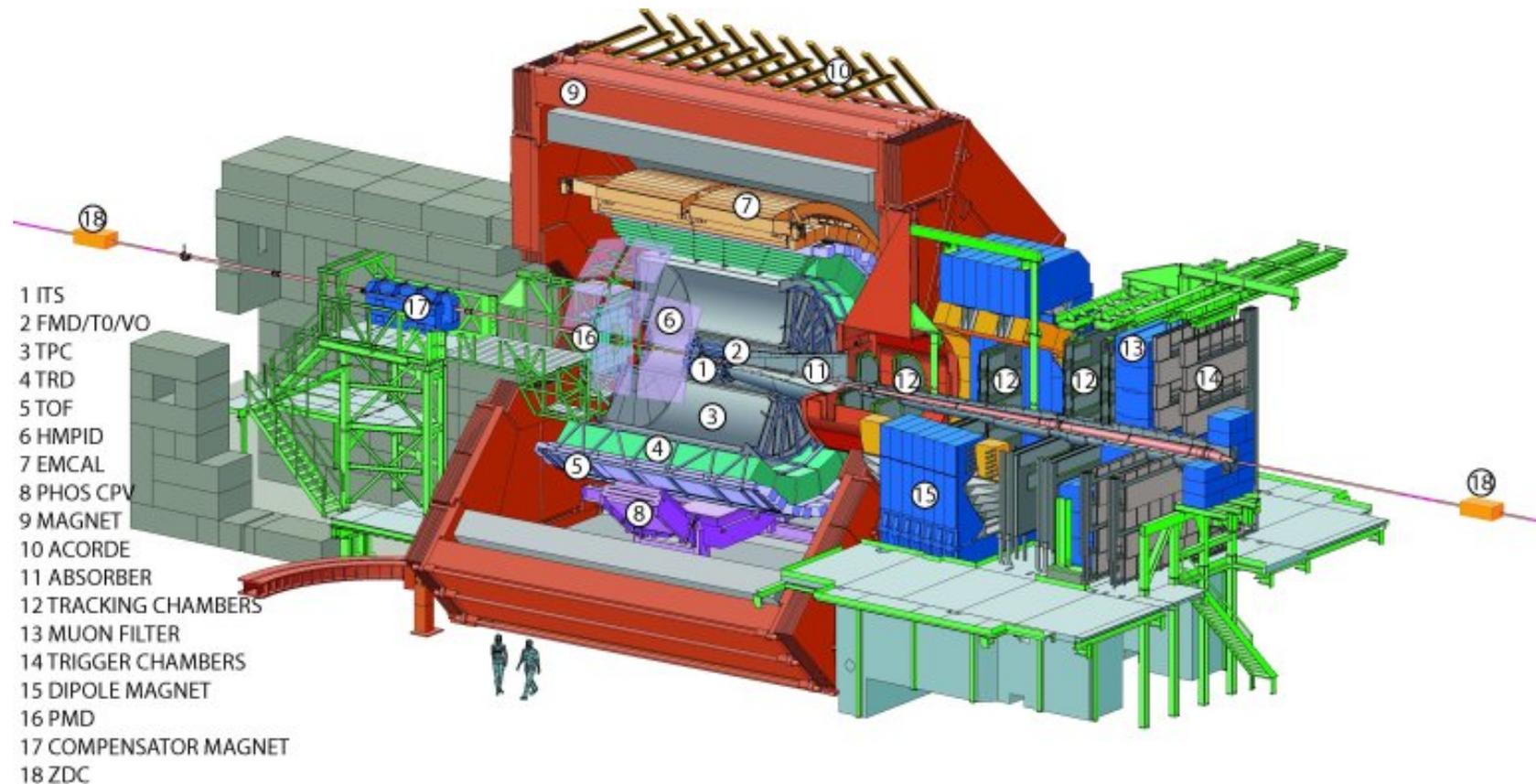
- ◆ 700 scientifiques, 52 pays



ALICE

◆ Étude des plasmas de quarks et gluons

- doit pouvoir séparer les nombreuses particules produites à chaque collision plomb-plomb (jusqu'à 20 000), et identifier leur nature



◆ 1200 membres

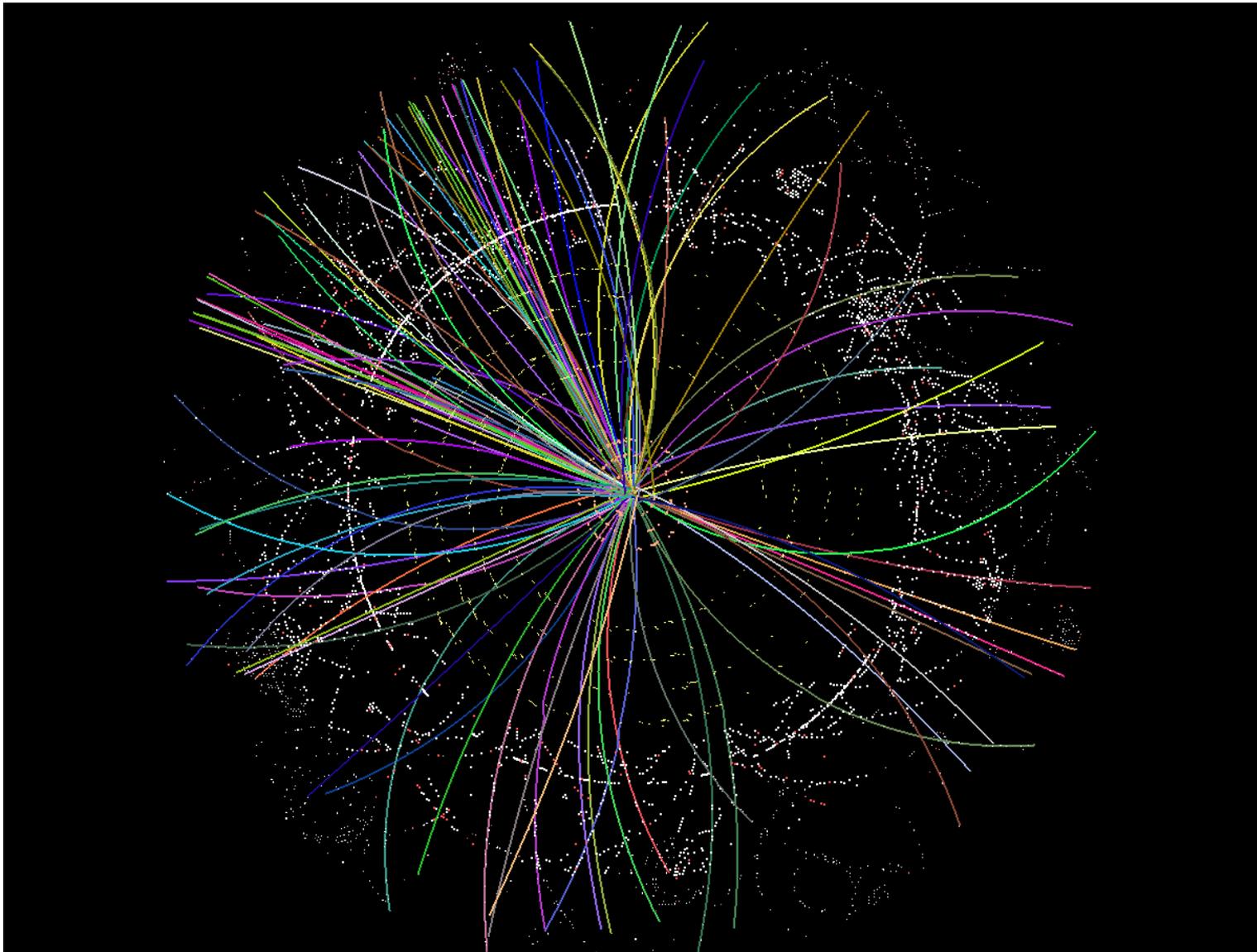
Généralités

Trajectographes

Calorimètres

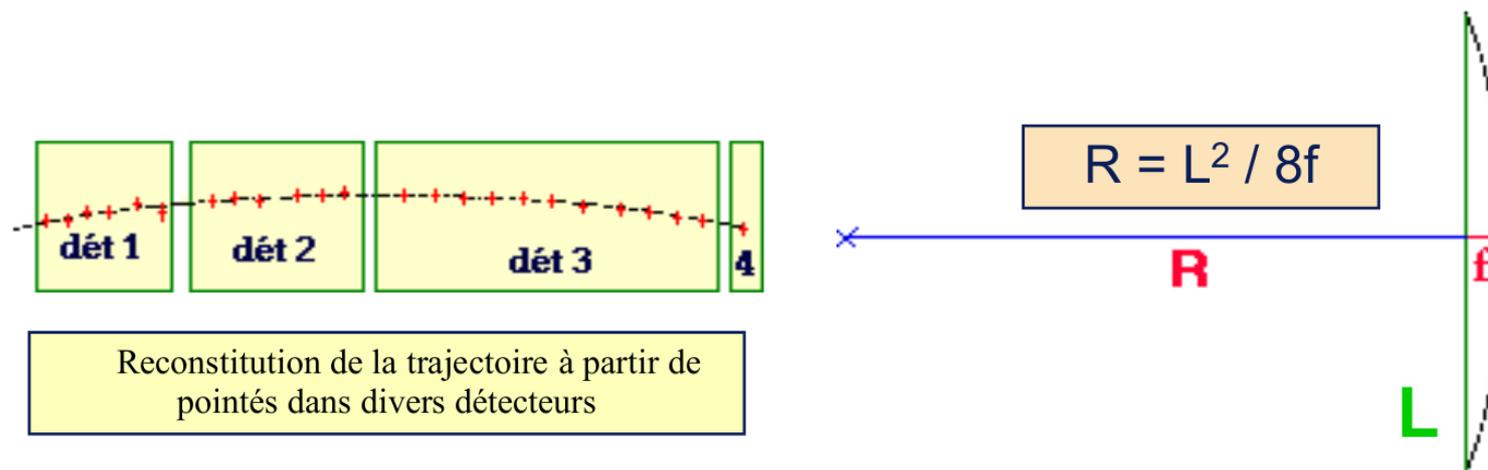
Reconstruction des traces

- ◆ Passage des particules : déposent de l'énergie dans différentes couches de détecteurs placés tout autour
 - reconstruction des traces des particules



Mesure de l'impulsion

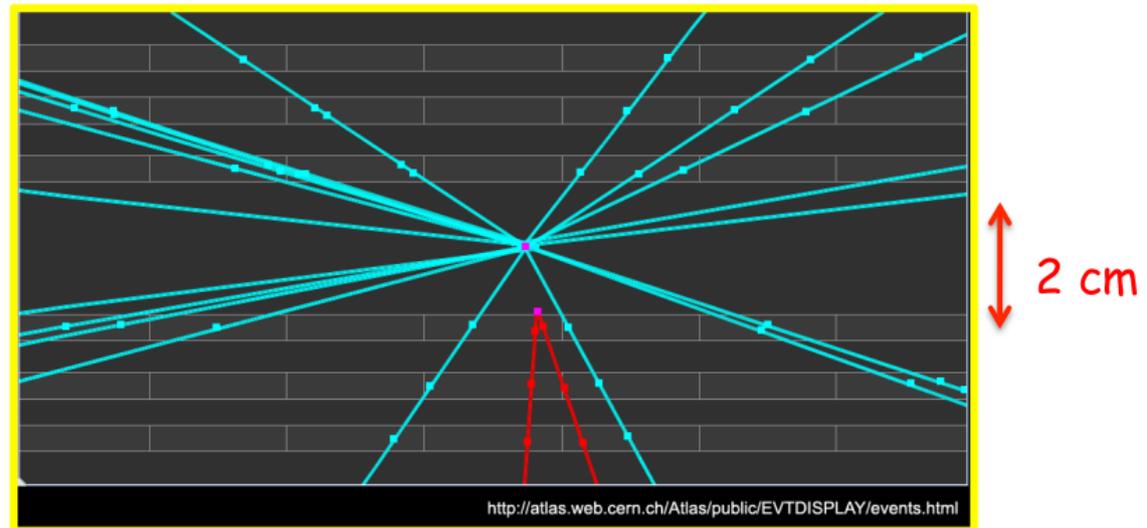
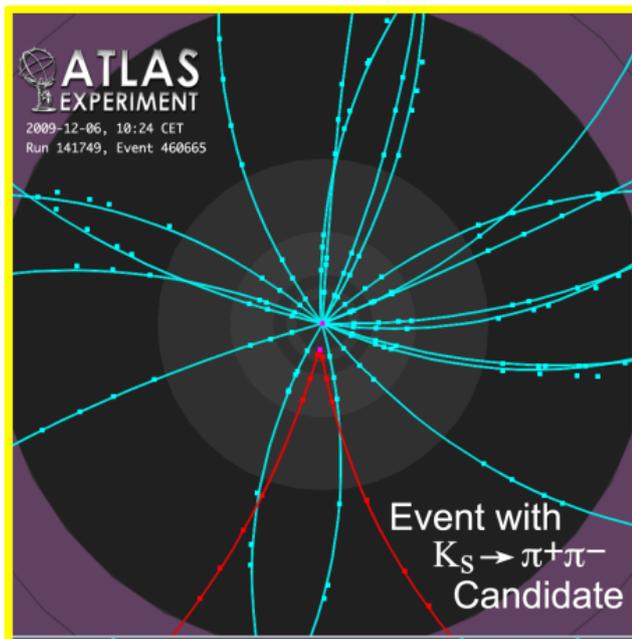
- ◆ But : mesurer la **quantité de mouvement P**
- ◆ Mesure de $P =$ mesure de trajectoire (traces chargées)
 - valeur de P proportionnelle au rayon de courbure
- ◆ $P \text{ (GeV)} = 0.3 \text{ B(Tesla)} R \text{ (m)}$
 - Le rayon de courbure d'un arc est lié à sa flèche



- ◆ Reconstitution de la trajectoire à partir de **points** dans divers détecteurs

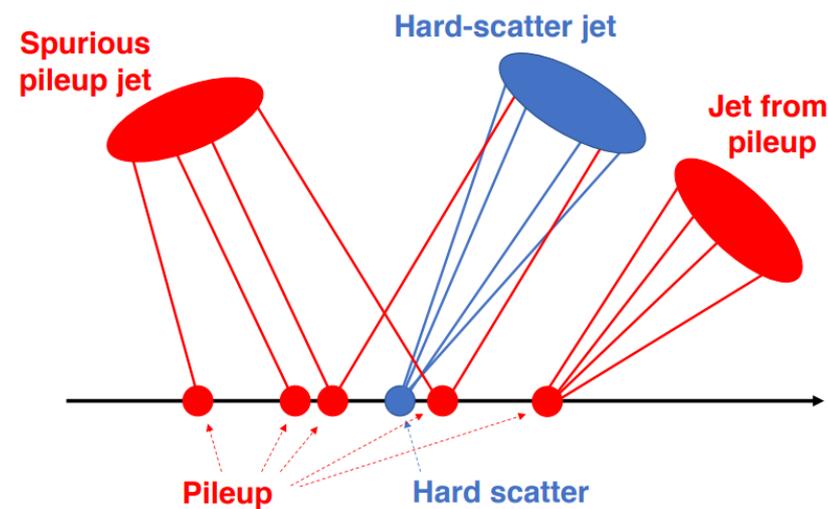
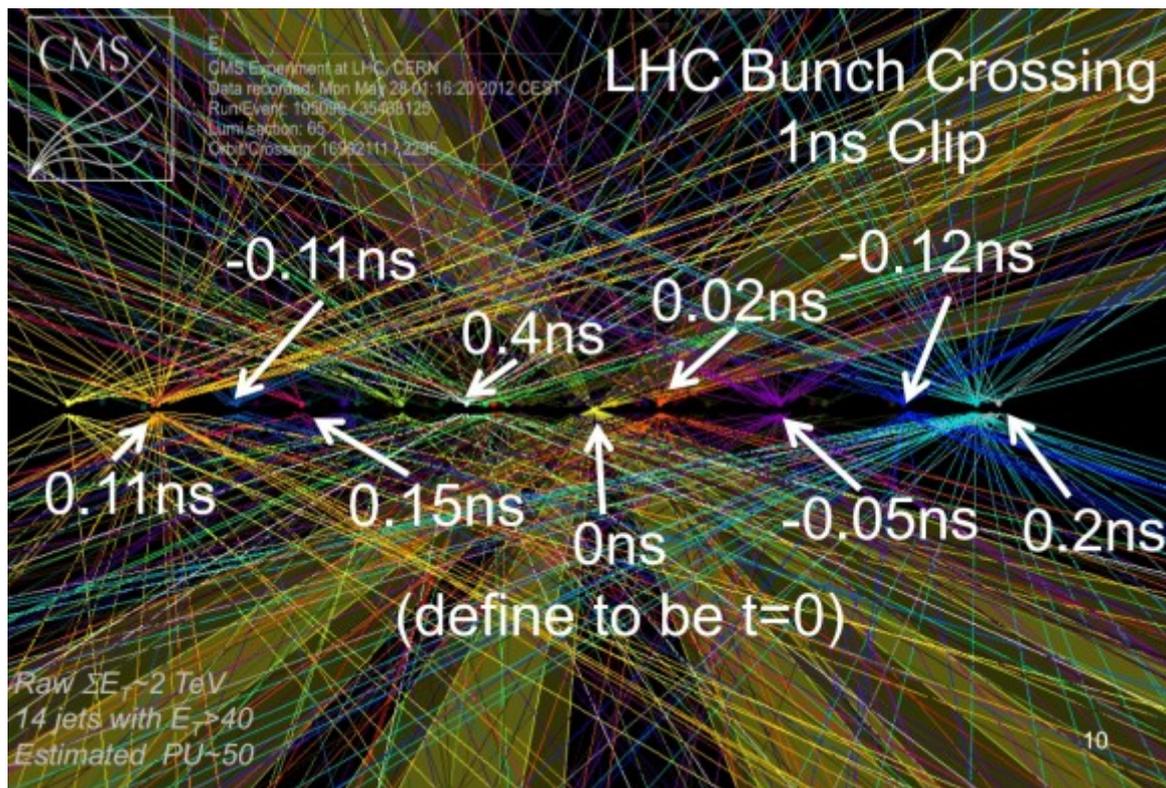
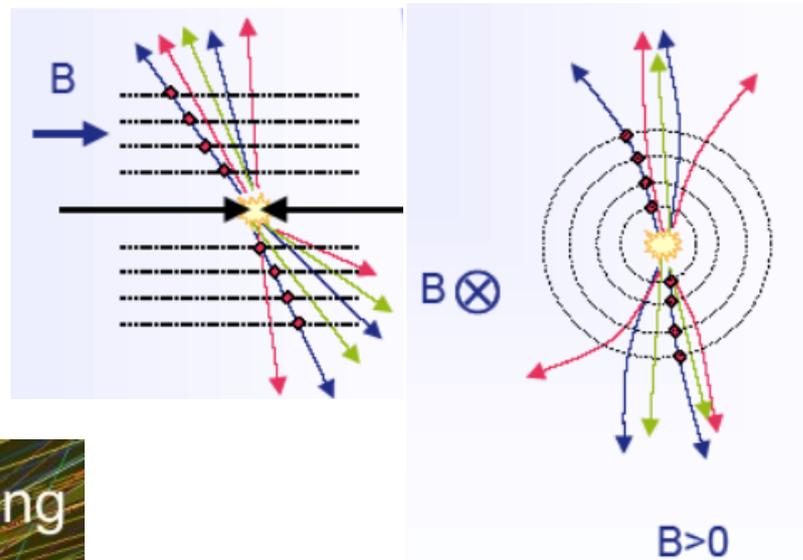
Reconstruction du vertex (1)

- ◆ Mesurer les courtes durées de vie et reconstruire le point d'interaction (**vertex**)
 - très courts parcours et «micro vertex»
- ◆ Défi : voir des parcours de 1 mm en extrapolant de 5 cm
 - la zone où se produisent les **désintégrations** est **dans le tube à vide**, à quelques cm de la première couche du détecteur
 - le détecteur comprend 2 à 3 couches minces destinées à fournir des pointés très précis
 - **précision** d'un pointé micro vertex : une **dizaine de microns**



Reconstruction du vertex (2)

- ◆ Extrapolation des traces vers le centre
 - empilement : >25 vertex sur 5 cm
 - résolution des détecteurs du LHC $\sim 10 \mu\text{m}$

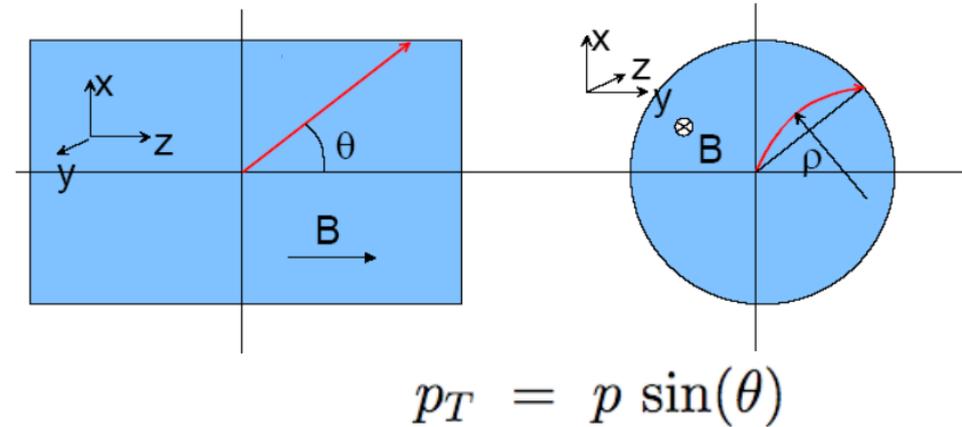


Résolution d'un trajectographe

◆ Résolution de l'impulsion transverse :

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \sqrt{\frac{720}{N+4} \cdot \frac{\sigma_y \cdot p_T}{0.3 \cdot B \cdot L^2}} \oplus \frac{0.0136}{0.3 \cdot \beta \cdot B \cdot L} \sqrt{\left((N-1) \frac{x/\sin \theta}{X_0} \right) \sqrt{C_N}}$$

- N = nombre de points de mesure
- σ_y = précision sur la position du point de mesure
- B = champ magnétique
- L = longueur totale du détecteur
- $x/\sin\theta/X_0$ = quantité totale de matière traversée

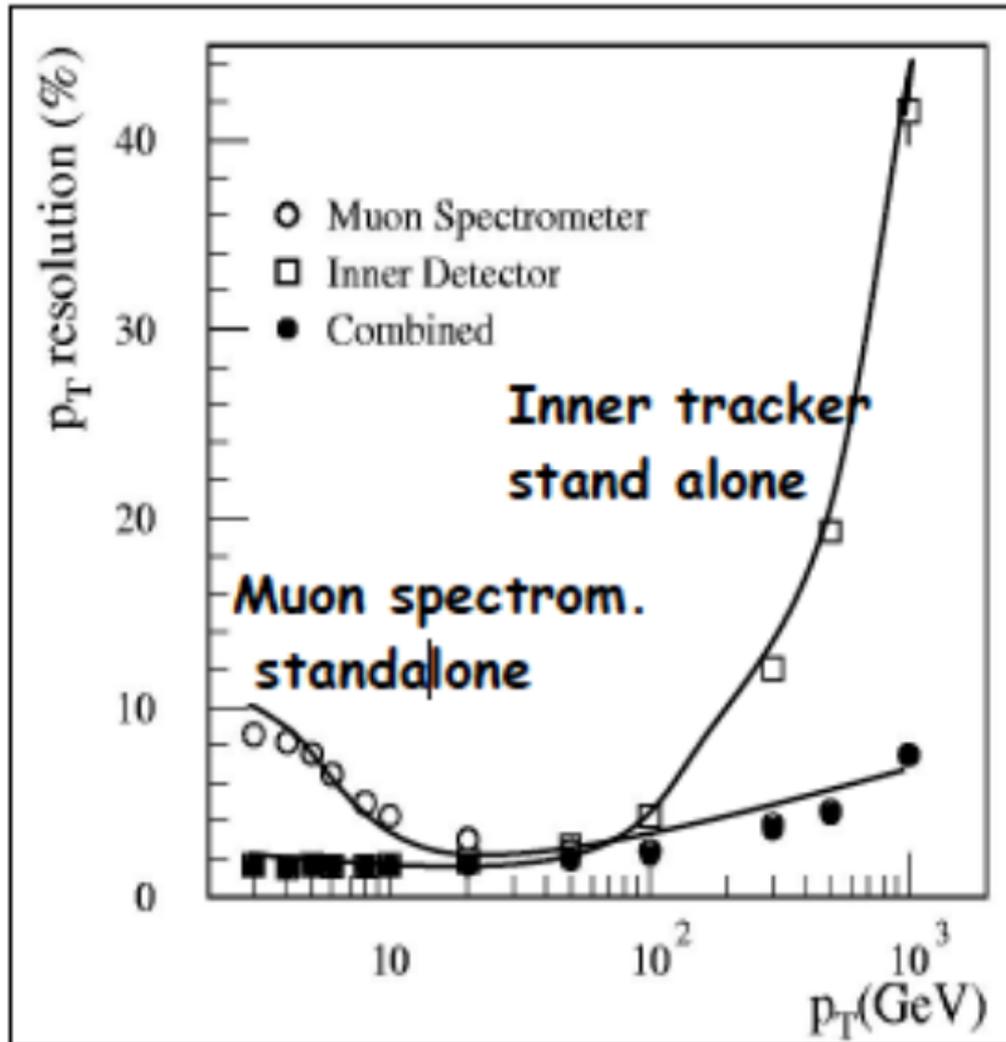


◆ Pour améliorer cette résolution:

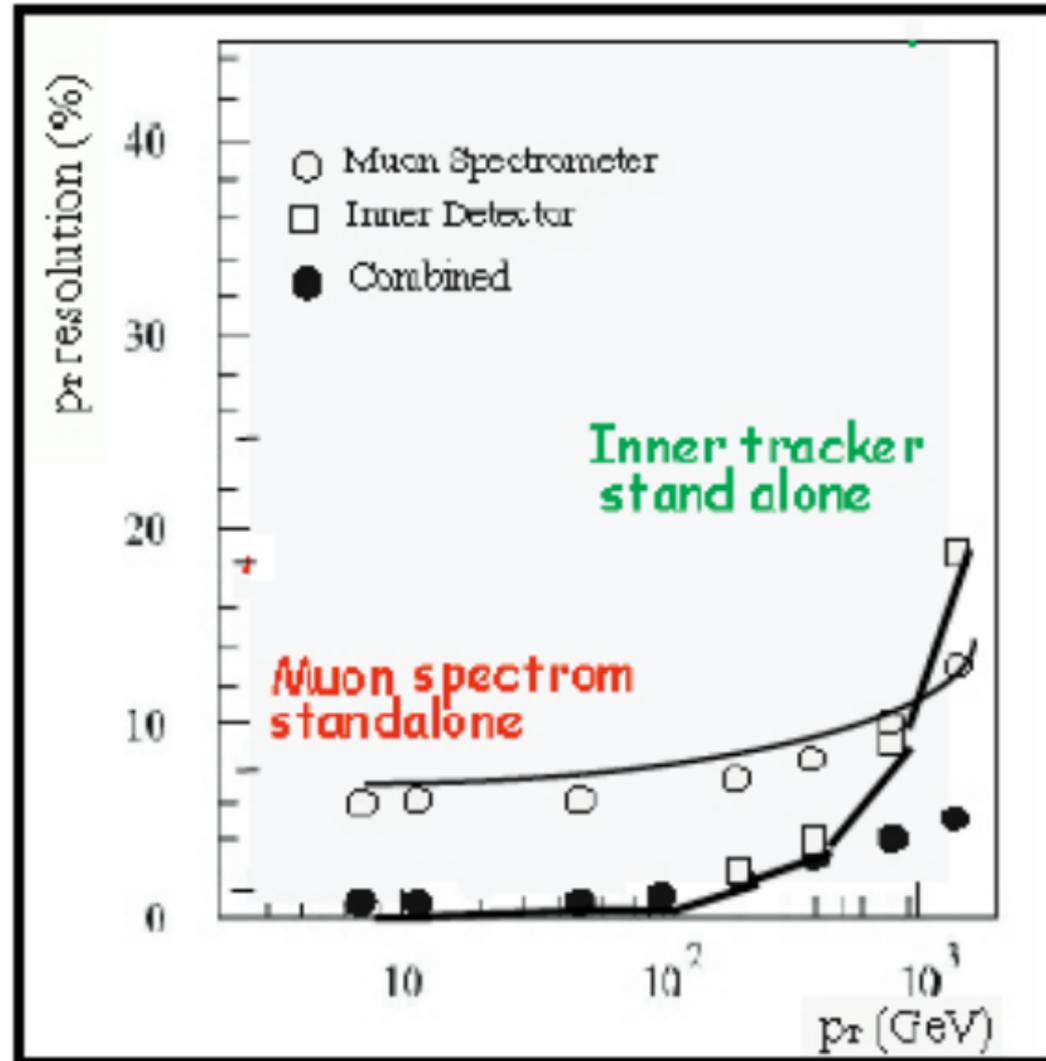
- augmenter le **nombre de points** de mesure (ie de couches)
- améliorer la **précision sur la position**
- augmenter le **champ magnétique**
- augmenter le **bras de levier**
- diminuer la **matière**

Exemple : muons dans ATLAS et CMS

ATLAS



CMS



- ◆ La résolution de dégrade quoi qu'il arrive à grande impulsion (courbure)
- ◆ Combinaison des trajectographes internes et spectromètres à muons

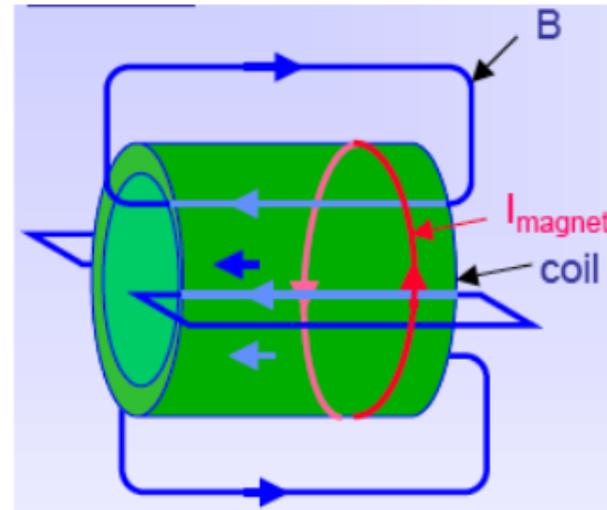
Enjeu : Champ magnétique

- ◆ Premier séminaire sur la possibilité d'un LHC en 1984 :
“Avec des collisionneurs hadroniques opérant à une énergie dans le centre de masse de plusieurs TeV, les muons seront les seuls leptons qui pourront être détectés sur une grande gamme d'énergie.”
⇒ chercher le boson de Higgs se désintégrant en 4 muons

- ◆ Donne son nom aux expériences :

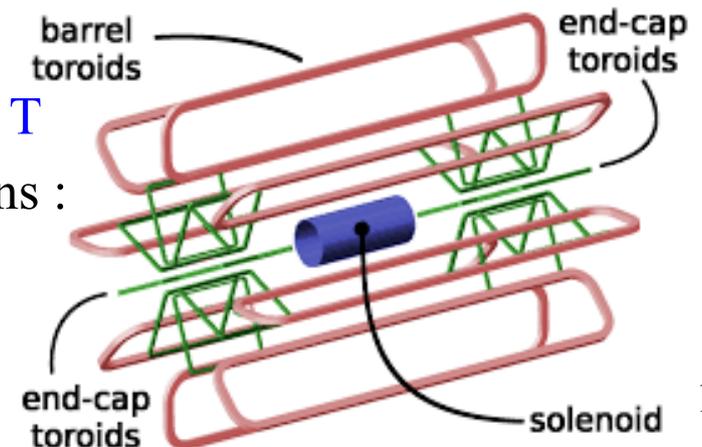
- ◆ CMS (Compact muon **Solenoid**) :

- un seul solénoïde + retour de champ
- 3.8 T dans la partie interne



- ◆ ATLAS (A **Toroidal** LHC ApparatuS)

- un aimant solénoïdal pour la partie centrale : 2 T
- un aimant toroidal pour le spectromètre à muons : 1 T

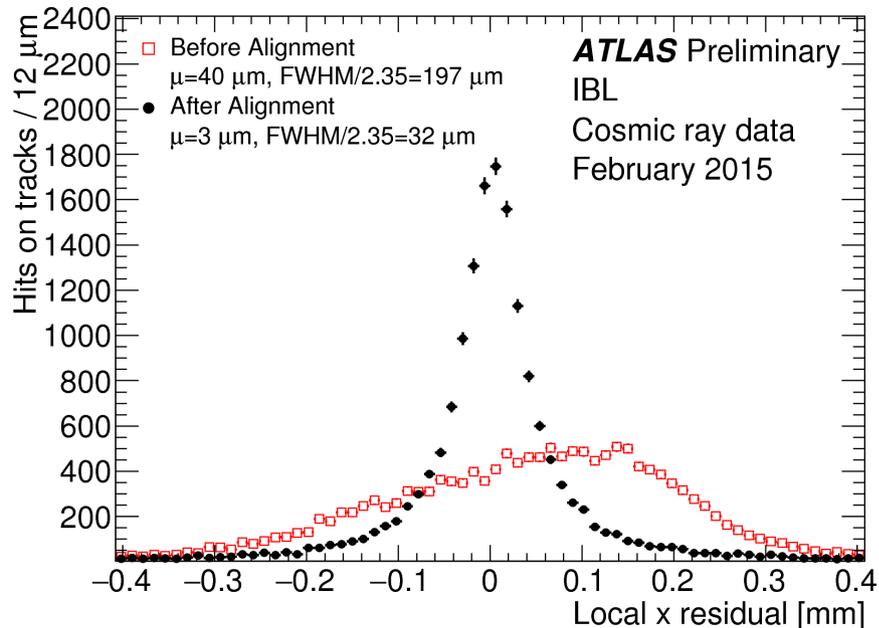


Enjeu : alignement

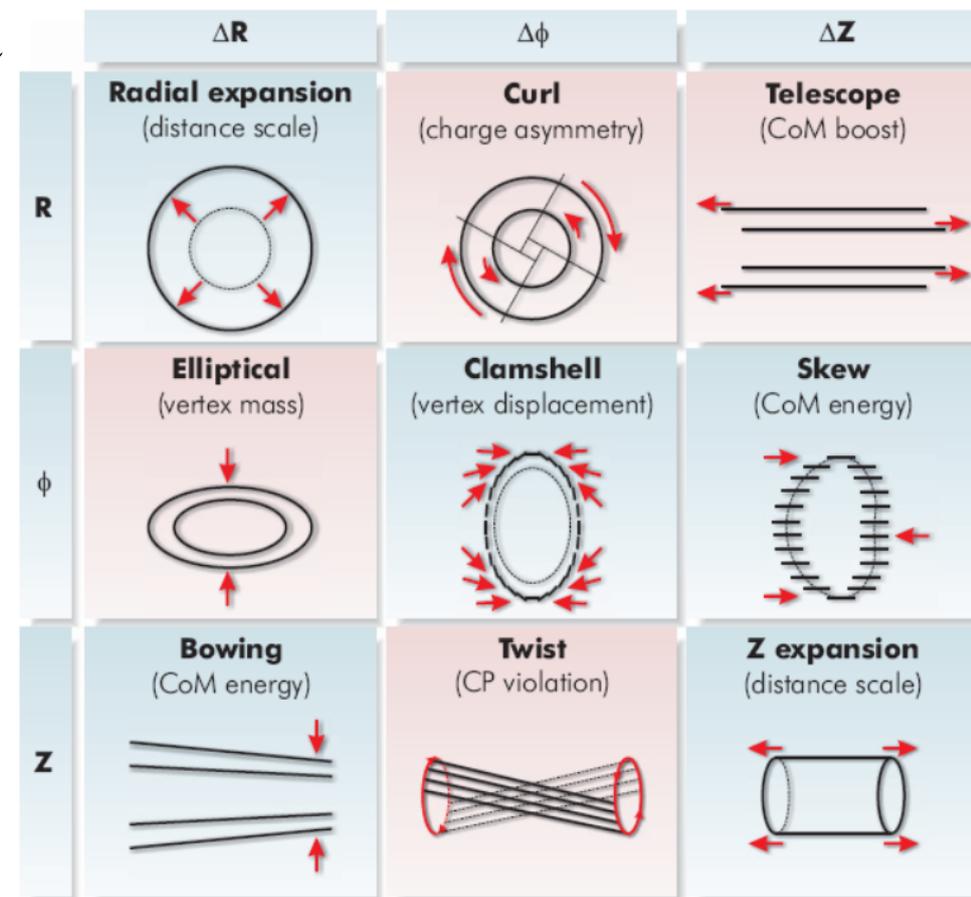
- ◆ Résolution dépend de la précision sur la **position** des modules

- doit être **meilleure que 10-50 μm**
- sensible aux distorsions mécaniques

- ◆ Peut être **compensé** en mesurant précisément la position des modules avec des traces

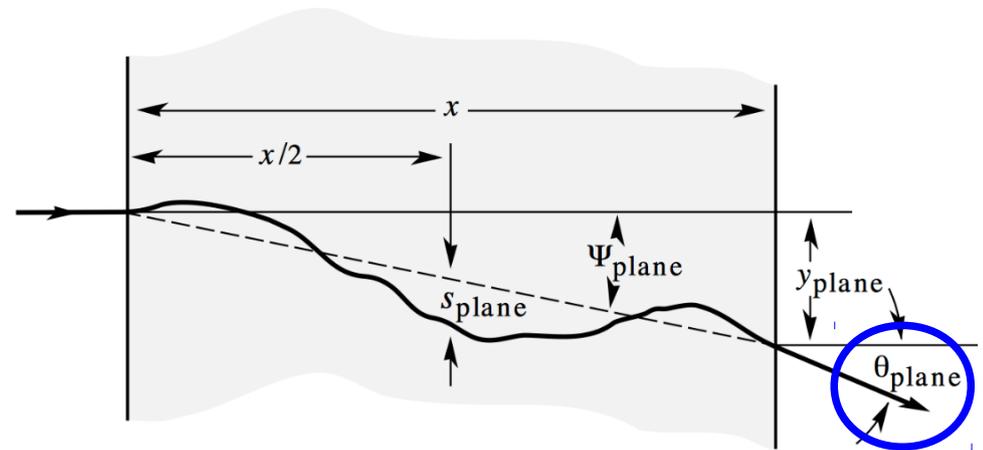
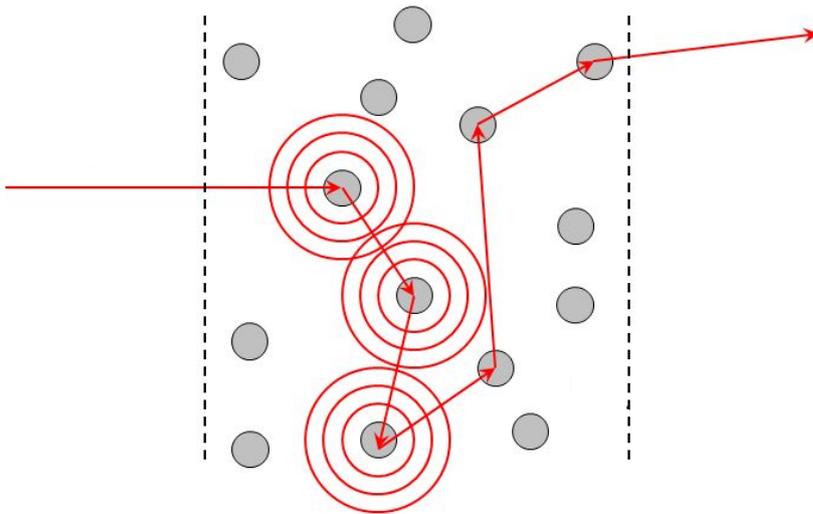


- résidus = distance entre trace extrapolée et position théorique du module



Enjeu : la matière (1)

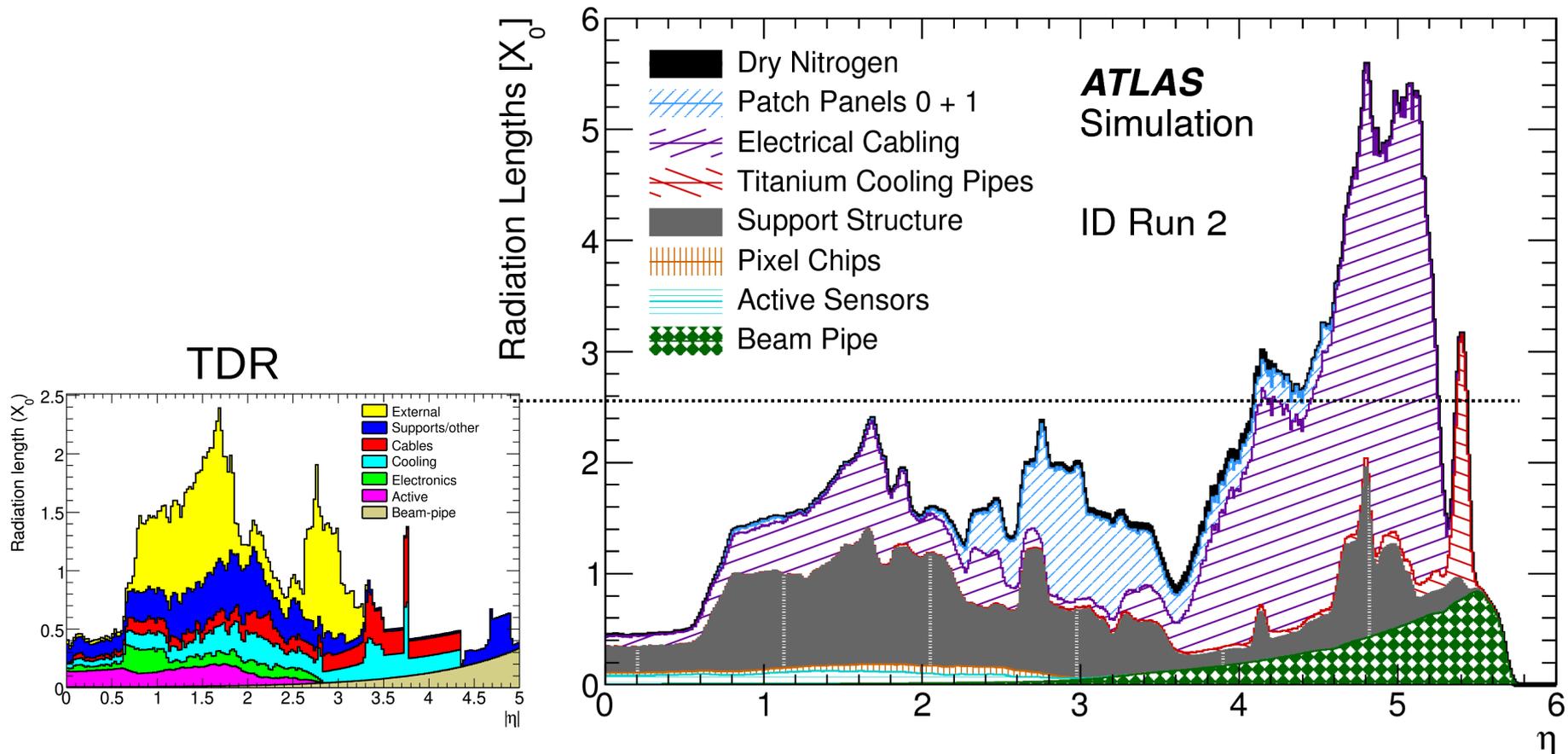
- ◆ **Diffusion multiple** : diffusion des particules chargées par les atomes du milieu causent un changement de direction
- ◆ Exemple : $p = 1 \text{ GeV}$, $x = 300 \text{ } \mu\text{m}$, Si : $X_0 = 9.4 \text{ cm}$
 \Rightarrow angle de 0.8 mrad
 - pour une distance de 10 cm, cela correspond à $80 \text{ } \mu\text{m}$, plus grand que la résolution typique d'un détecteur à silicium



- ◆ Angle de sortie : $\theta_{MS} \propto \frac{1}{p} \cdot \sqrt{\frac{x}{X_0}}$
- ◆ On cherche au maximum à minimiser la matière !

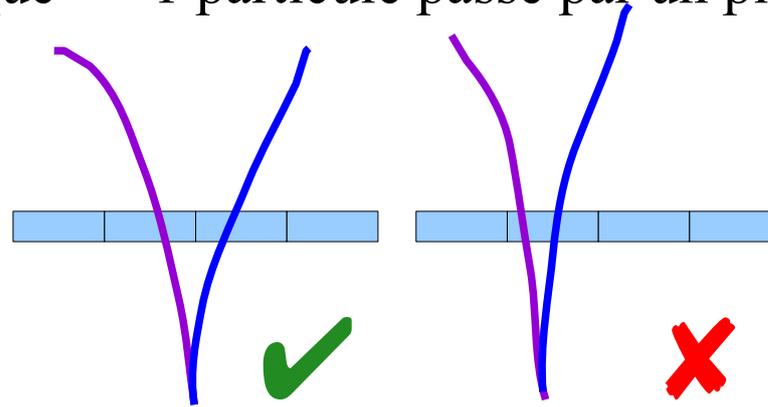
Enjeu : la matière (2)

- ◆ Minimum de X_0 (distance moyenne nécessaire pour qu'un électron perde $1 - 1/e$ de son énergie)
- ◆ Exemple de l'importance de bien estimer ses services (câbles et tuyaux) dans un détecteur interne
 - IBL Technical Design Report "External IBL supports and services outside the active tracking volume are not included in the description yet."

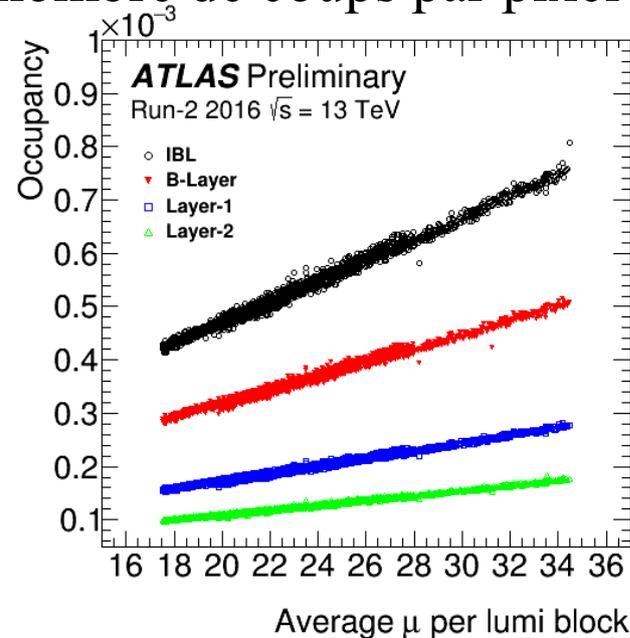


Enjeu : l'empilement (1)

- ◆ On veut être sûr que $\ll 1$ particule passe par un pixel donné à chaque collision



- ◆ L'”occupation” (nombre de coups par pixel par collision) augmente avec l'empilement:

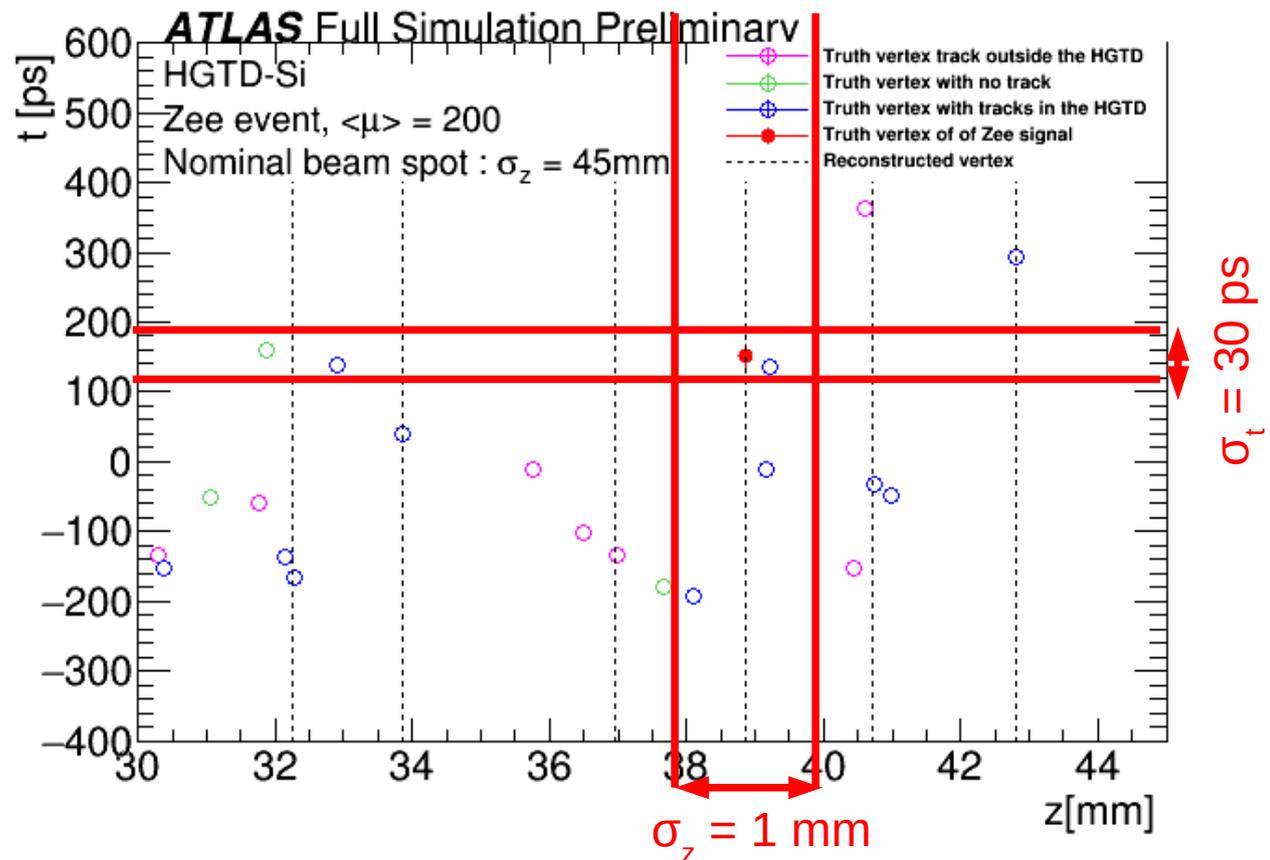
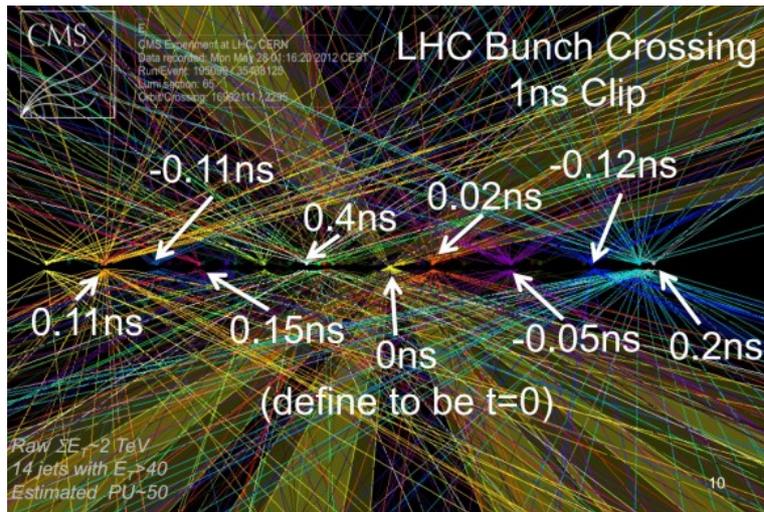


- ◆ Nécessité de **diminuer la taille des pixels**

– ATLAS : pixels de $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ actuellement, $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ pour l'upgrade 21

Enjeu : empilement (2)

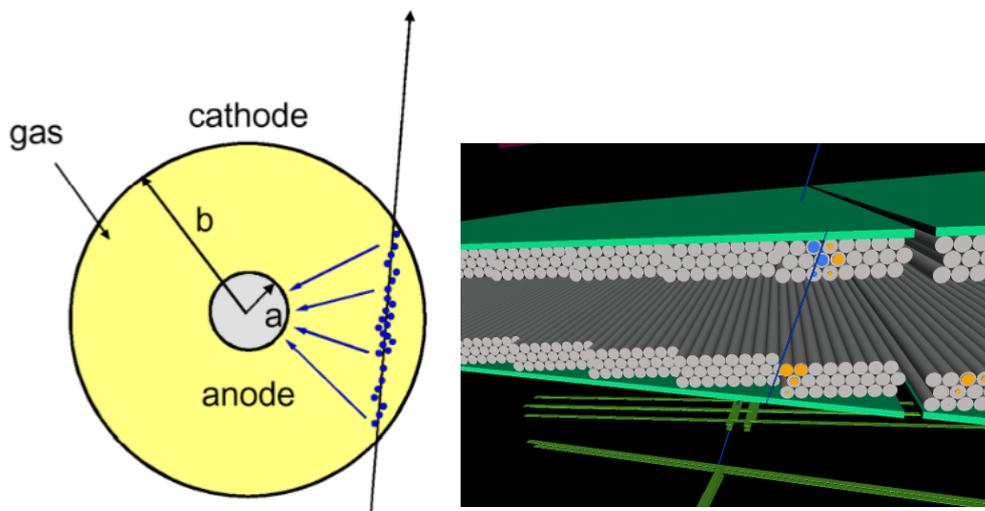
- ◆ Défi pour les upgrades des détecteurs : ajouter une **information sur le temps de vol** de la particule



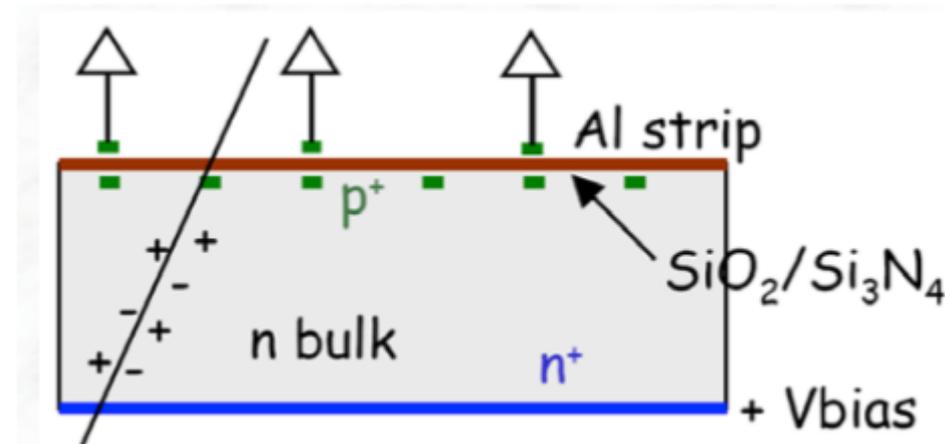
- ◆ Nécessite une résolution en énergie de **30 ps** dans les détecteurs à Silicium
 - HGTD dans ATLAS, ECAL dans CMS

Détecteurs des trajectographes (1)

- ◆ Deux grandes familles :
- ◆ Gazeux



- ◆ Solides : principalement en Si
 - la plupart des détecteurs pour le tracking de précision
 - dopé n : la majorité des charges porteuses sont des électrons
 - dopé p : la majorité des charges

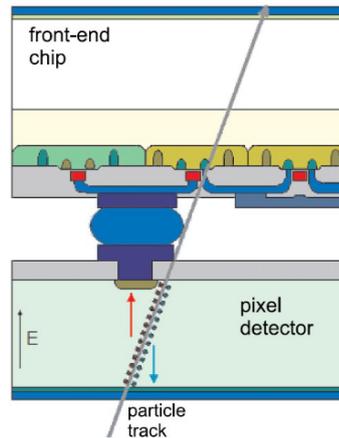


	Gaz	Solide
Densité	basse	haute
Nbr atomique	bas	modéré (Z=14)
Énergie de ionisation	modérée (~30 eV)	faible (~3 eV)
Vitesse du signal	modérée (10 ns – 10 µs)	rapide (< 20 ns)
Coût	modéré	haut

Détecteurs des trajectographes (2) : pixels

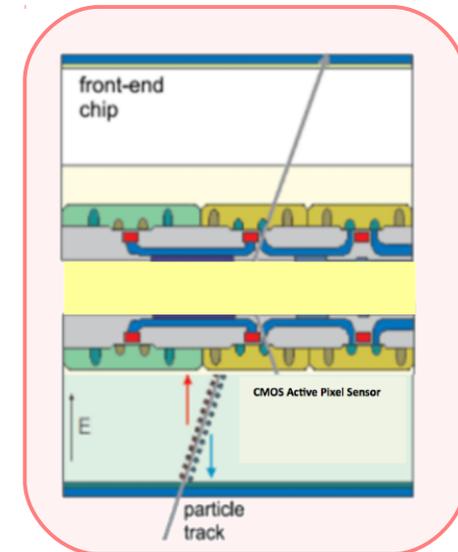
◆ Capteurs hybrides

- capteur et lecture produits séparément, puis connectés
- les pixels sont lus 1 par 1



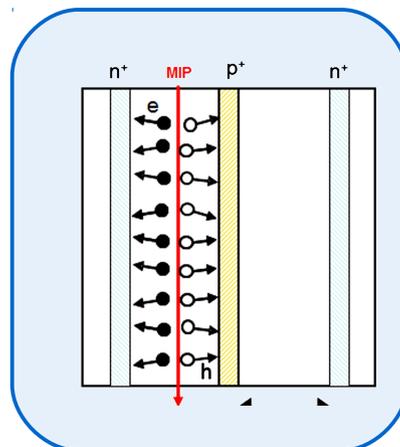
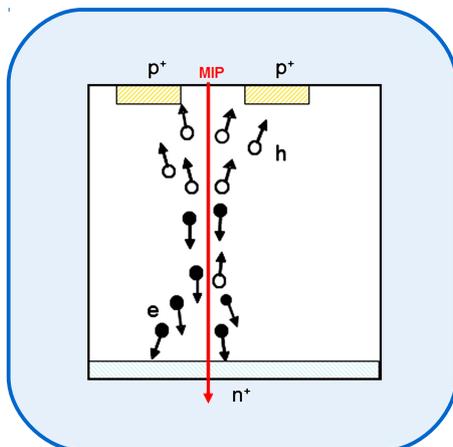
◆ Capteurs CMOS

- électronique de lecture dans le substrat
- relativement nouveau en HEP
 - tenue aux radiations ?



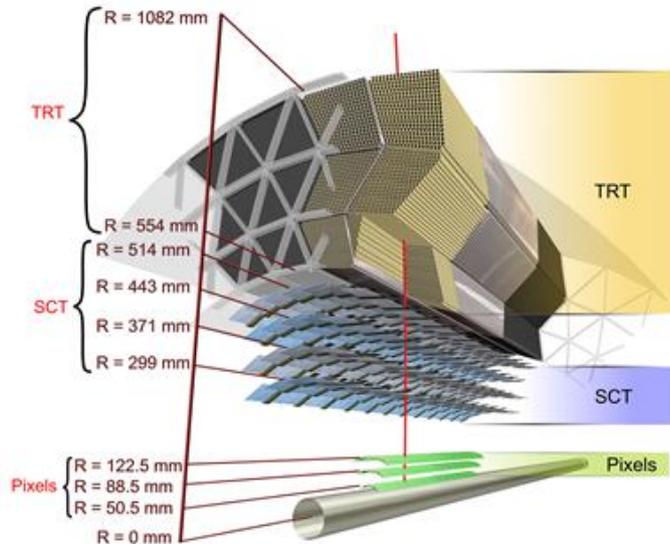
◆ Deux types:

- **planaires**: électrodes implémentées sur la surface du silicium
- **3D**: électrodes pénétrant le substrat perpendiculairement à la surface.



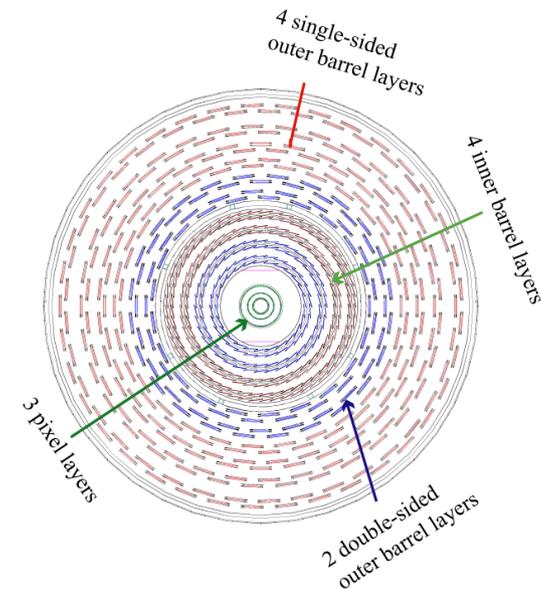
Les trajectographes du LHC (1)

- ◆ ATLAS :
- ◆ Trois technologies différentes



- ◆ TRT : Trajectographe à Rayonnement de Transition
 - tubes proportionnels à dérive remplis d'un mélange de gaz dont du xénon
- ◆ SCT : trajectographe à semi-conducteur
 - 6.3 M de canaux
- ◆ Pixels
 - 80 M de canaux

- ◆ CMS :
- ◆ Tout en silicium

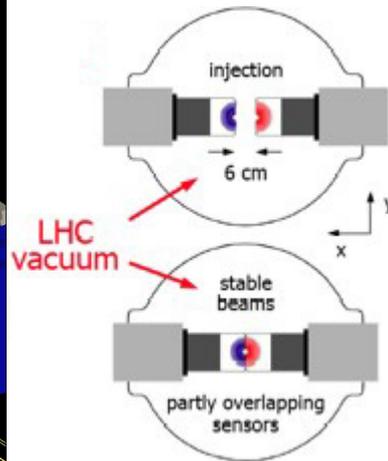
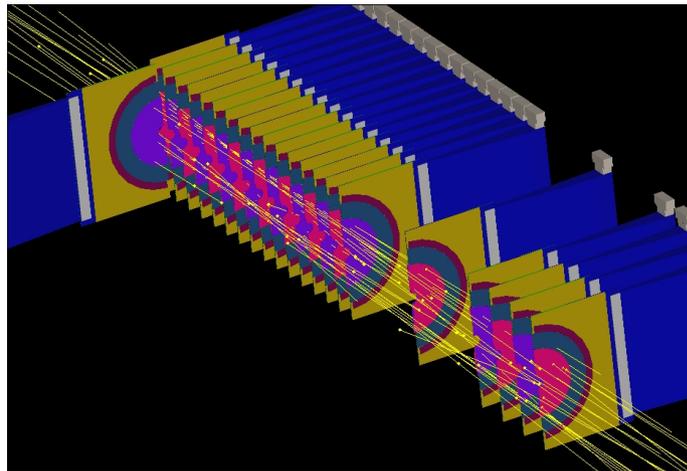


- ◆ Micro-pistes
 - $\sim 214 \text{ m}^2$ de surface, 11.4 M de canaux
- ◆ Pixels
 - 3 couches centrales ($\sim 1 \text{ m}^2$) dans une boîte de chaussures
 - 66 M de canaux

Les trajectographes du LHC (2)

◆ LHCb : VELO (VERTex LOcator)

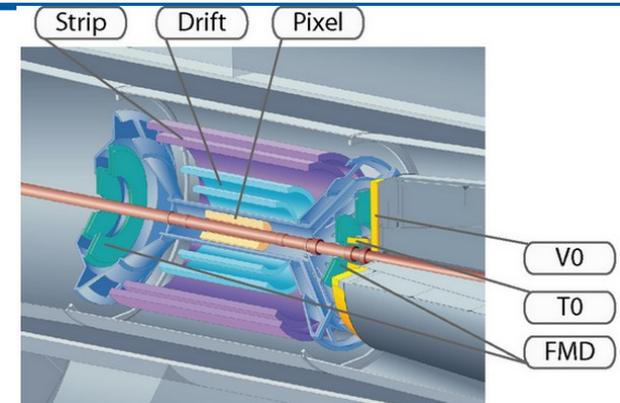
- mesure précise du point où un méson B décroît



◆ VELO

- 42 détecteurs à Si le long du détecteur, dans le tube faisceau, à seulement 5 mm du point de collision
- rétractable jusqu'à stabilisation du faisceau

◆ ALICE



◆ TOF : Time Of Flight

- 160 000 Multigap Resistive Plate Chambers

◆ TPC : Time Projection Chamber

- chambres proportionnelles multifils

◆ ITS : Inner Tracking System

- taille d'une roue de bicyclette
- signale s'il y a eu une collision

◆ Trajectographe interne

- Silicium, 2.6 M de canaux

◆ Spectromètre à muons

- 10 plans de chambres à fils (1 M de canaux)

Généralités

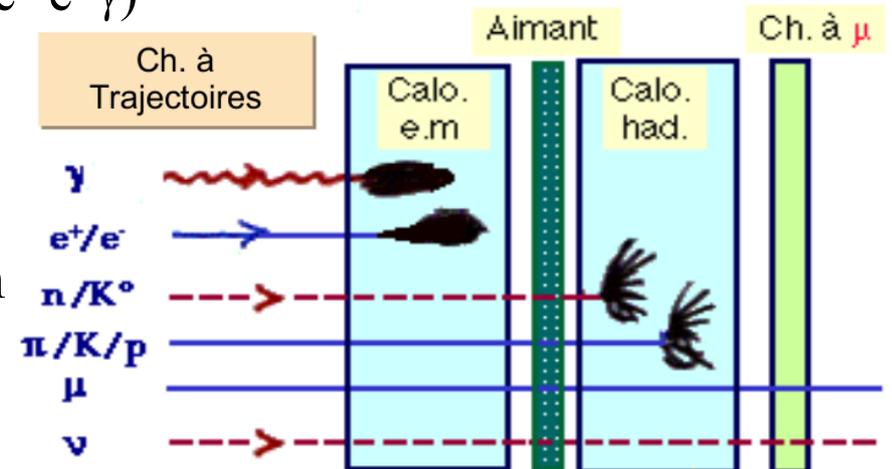
Trajectographes

Calorimètres

- ◆ En Physique des Hautes Energies, un calorimètre est un appareil pour détecter et mesurer les propriétés des particules par leur absorption complète dans la matière par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie

But des calorimètres

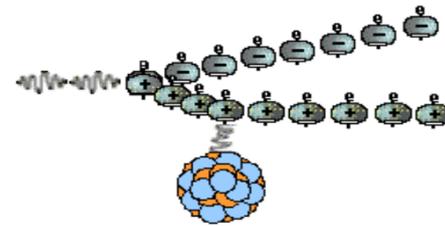
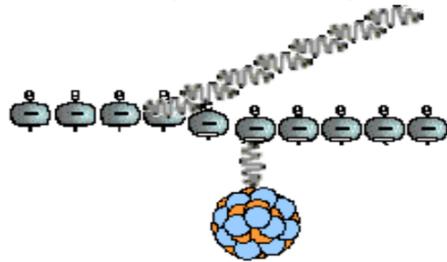
- ◆ Mesurer l'énergie des particules
- ◆ Identifier les particules
- ◆ Passage des particules dans la matière
 - Les électrons sont vite arrêtés par la matière, car leur masse est faible et ils rayonnent beaucoup de photons
 - Les autres particules «rayonnent» peu, mais interagissent nucléairement, ... sauf les muons
 - Les muons sont donc les plus pénétrants (sauf neutrinos)
- ◆ Dispositif classique de 3 couches de calorimètres
 - Calorimètre électromagnétique (gerbes $e^+ e^- \gamma$)
 - Calorimètre hadronique
 - Chambre à muons
- ◆ Vision idéalisée : Un neutron ou un pion peuvent interagir dès le calorimètre électromagnétique, les gerbes se chevaucher, etc...



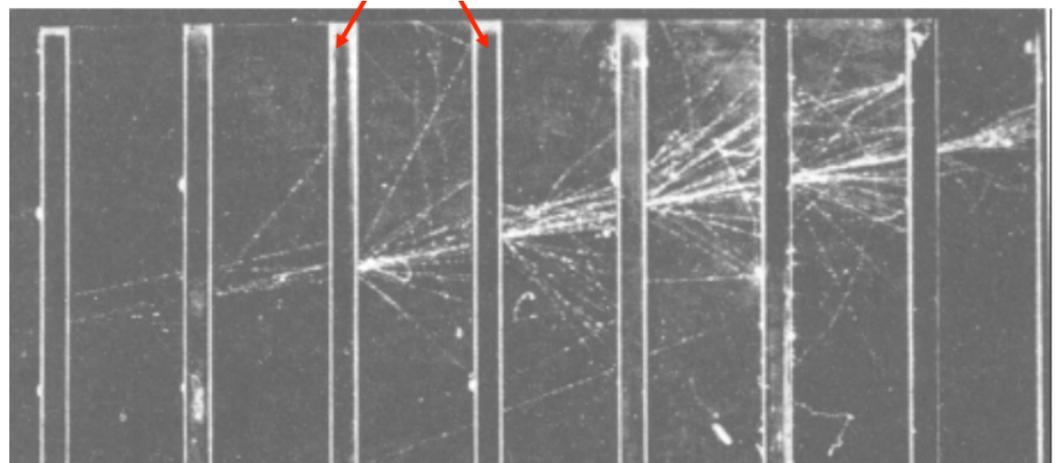
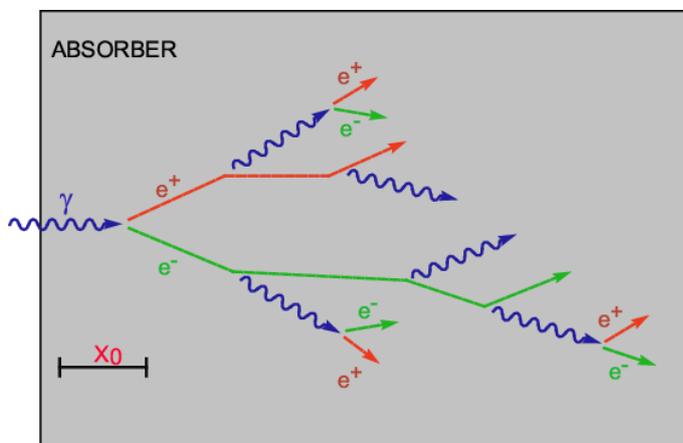
Calorimètres électromagnétiques (1)

- ◆ Deux phénomènes arrêtent γ , électrons et positrons à proximité de noyaux lourds :

- rayonnement de freinage : $e \rightarrow e + \gamma$
- production de paires : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



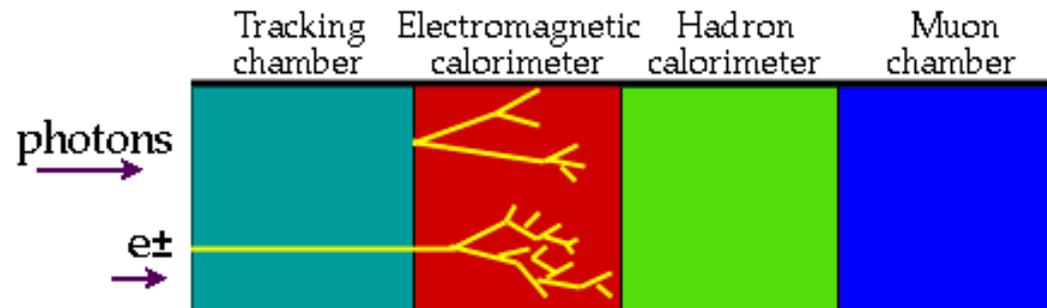
- ils multiplient le γ ou e^+ ou e^- initial en une **gerbe** d'électrons et positrons de basse énergie



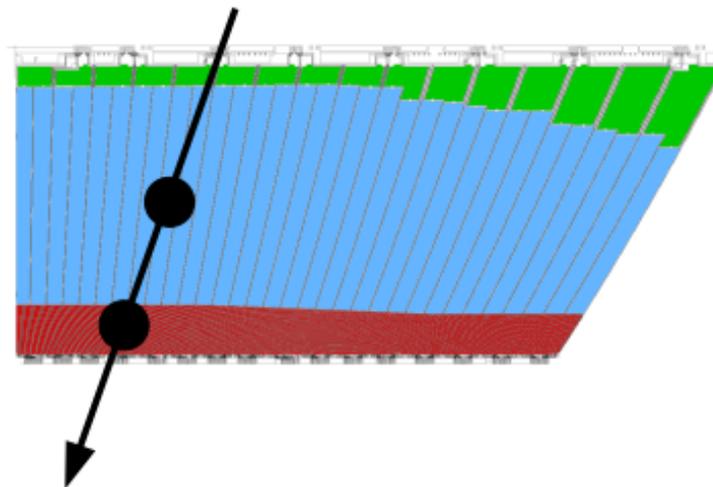
- ◆ On appellera absorbeur le milieu qui déclenche la gerbe

Calorimètres électromagnétiques (2)

- ◆ Les particules chargées cèdent leur énergie au milieu par ionisation
 - Somme énergies recueillies = $E(\text{particule primaire})$
- ◆ Les gerbes électromagnétiques sont spécifiques des γ et e^+/e^-
 - la propriété des électrons de rayonner beaucoup de photons est liée à leur faible masse. Les autres particules «rayonnent» peu
- ◆ Les gerbes créés par des photons ou des électrons sont légèrement différentes, mais pour les différencier : présence ou non d'une trace dans le détecteur interne



- ◆ Mesure de la **direction** : possible si calorimètre segmenté



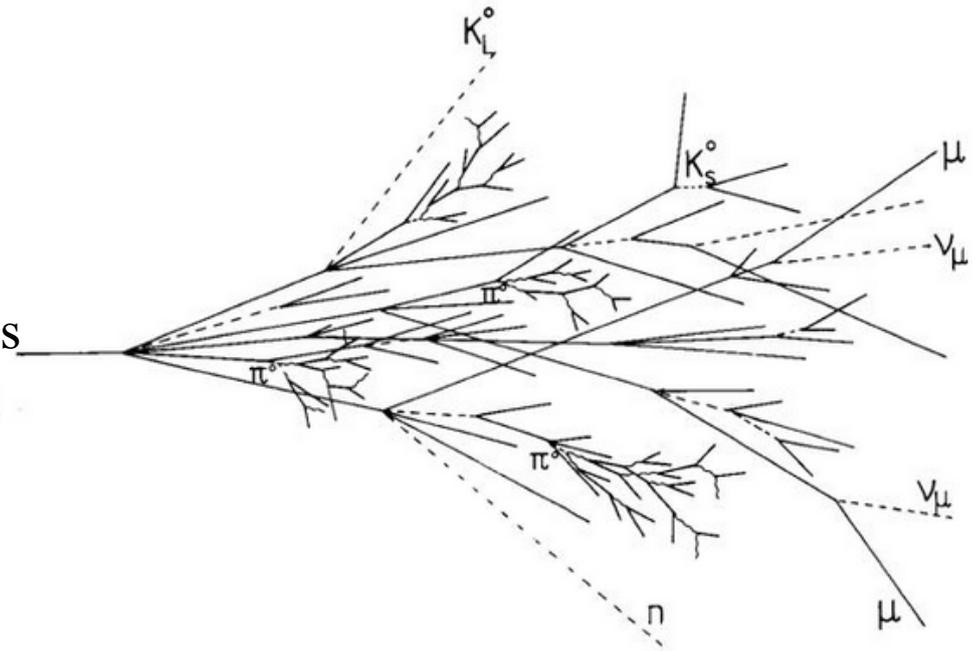
Calorimètres hadroniques

◆ Le mécanisme des **gerbes hadroniques** :

- les hadrons génèrent aussi des gerbes en traversant des matériaux lourds
- le mécanisme est plus complexe que celui des gerbes électromagnétiques. Les hadrons ne sont pas ou peu sujets au rayonnement de freinage, mais ils **interagissent fortement avec des noyaux**. Lors de ces interactions des π^0 , puis des γ sont aussi produits qui génèrent des sous-gerbes électromagnétiques

◆ Gerbe typique (100 GeV):

- 50% : elmng visible (π^0 , γ , e)
- 25% : hadronique visible (π^+ , p , μ)
- 25% : hadronique invisible (réactions de cassure, excitation des noyaux)
- 2% : perdu (ν)



◆ Les calorimètres hadroniques

- situés après les calorimètres électromagnétiques
- matériaux lourds : ex. ATLAS = 2900 tonnes !

◆ La **précision** sur l'énergie est **médiocre**

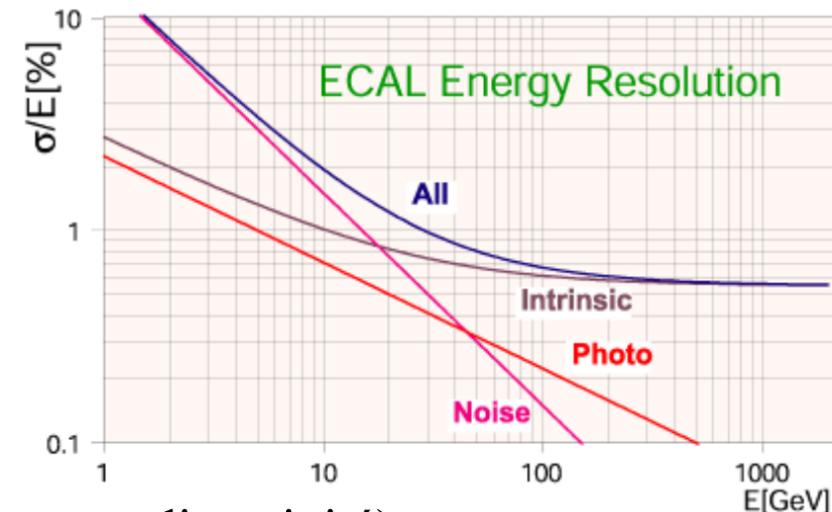
Résolution des calorimètres

- ◆ L'énergie d'une particule est mesurée avec une résolution σ_E
 - on envoie sur le détecteur des particules d'énergie connues, les distributions mesurées sont typiquement gaussiennes, de largeur $\sigma(E)$
- ◆ On a besoin de la meilleure résolution possible, surtout pour les calorimètres électromagnétiques

- ◆ La résolution en énergie s'écrit typiquement :

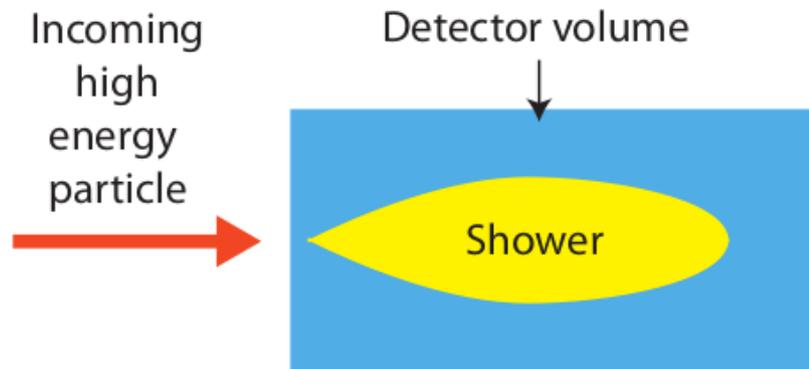
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

- a = terme d'échantillonnage
 - b = terme de bruit (bruit électronique, empilement, radioactivité)
 - c = terme constant (inhomogénéités, non linéarités, mauvaise calibration)
-
- ◆ Peut aussi être limitée par la matière avant le calorimètre
 - diminuer la matière dans le détecteur interne
 - ajouter un détecteur de pied de gerbe



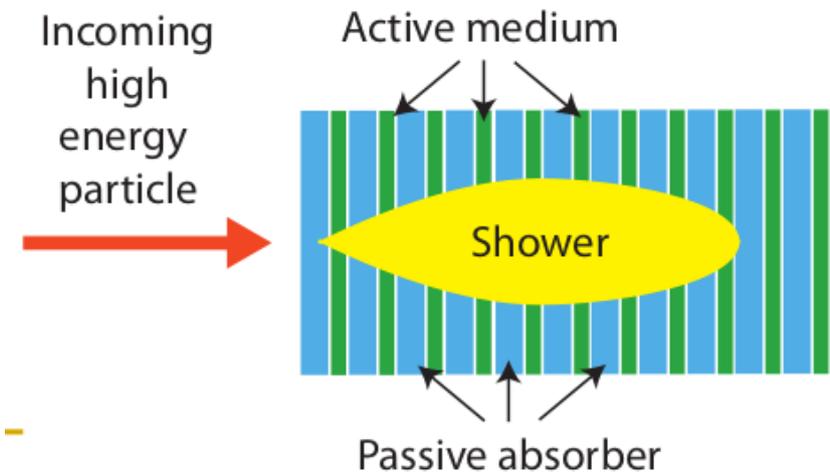
Calorimètres homogènes/à échantillonnage

- ◆ Homogène
- ◆ Le milieu **absorbeur** est le milieu **actif** (scintillateurs)
⇒ toute l'énergie est déposée dans le milieu actif



- ◆ Excellente résolution en énergie
- ◆ Pas de découpage longitudinal
 - résolution spatiale moyenne

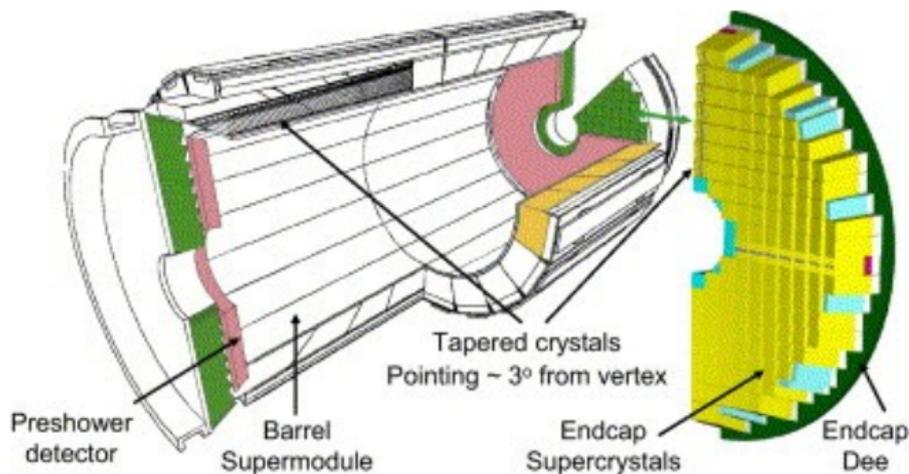
- ◆ À échantillonnage :
- ◆ **Sandwich** de couches de milieu dense (absorbeurs en plomb, uranium) et de milieu actif (scintillateurs, Ar liquide)



- ◆ Résolution en énergie limitée
 - dominée par la fluctuation de l'énergie déposée dans les parties actives
- ◆ Découpage longitudinal
 - intéressant pour l'identification
 - intéressant pour la résolution spatiale

Calorimètres électromagnétiques au LHC

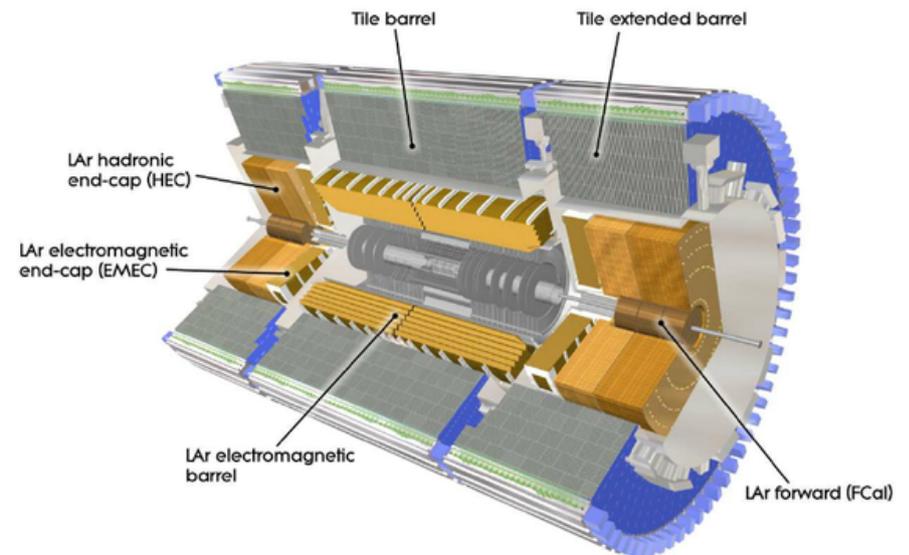
- ◆ CMS
- ◆ Calorimètre homogène aux cristaux de PbWO_4 ($X_0 = 8.9 \text{ mm}$)
 - $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.0174 \times 0.0174$



$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{12\%}{E} \oplus 0.3\%$$



- ◆ ATLAS
- ◆ Calorimètre à échantillonnage Plomb-Argon liquide ($X_0 = 5.6 \text{ mm}$)
 - géométrie en accordéon
 - $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.025$

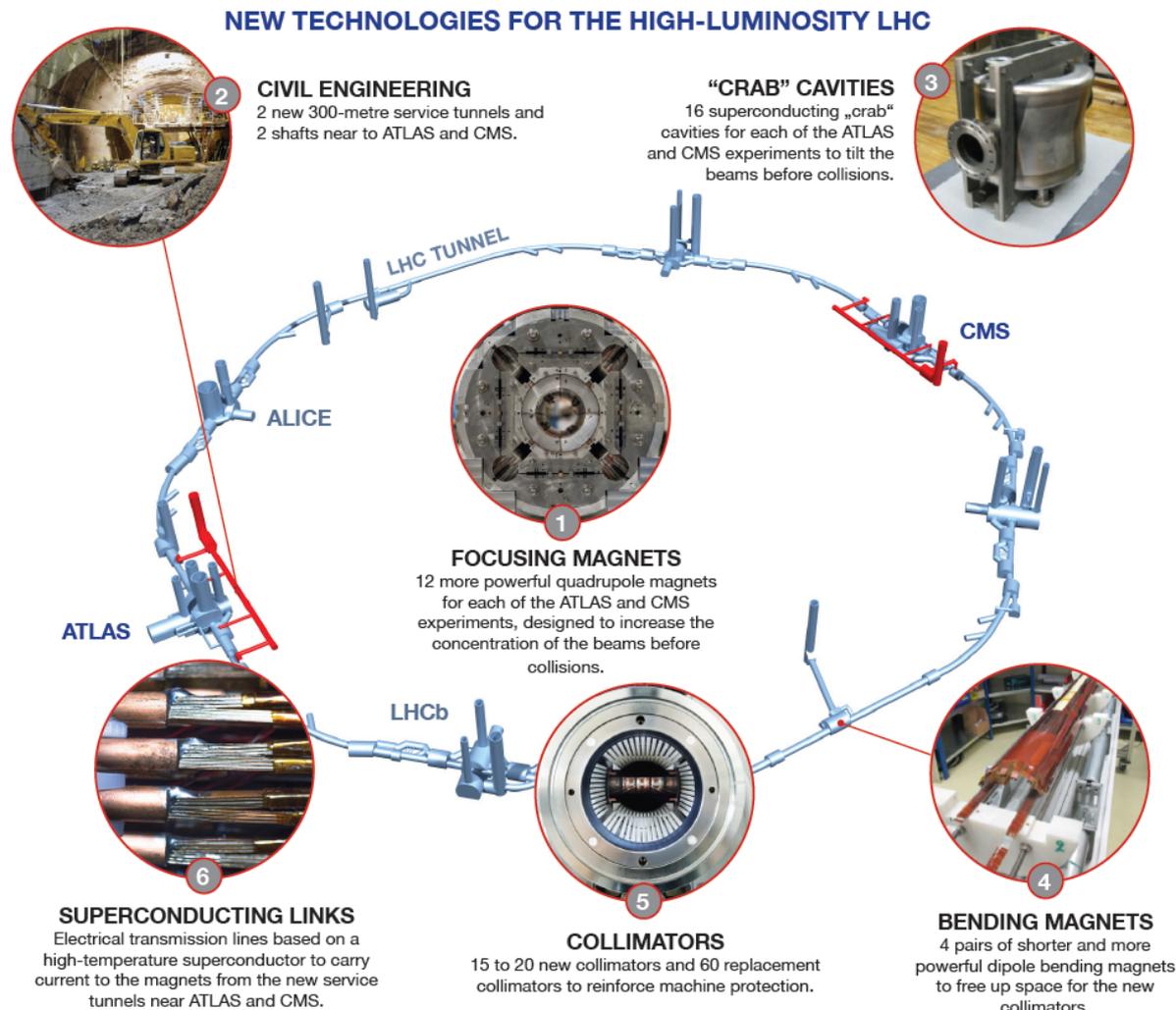


$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\%$$



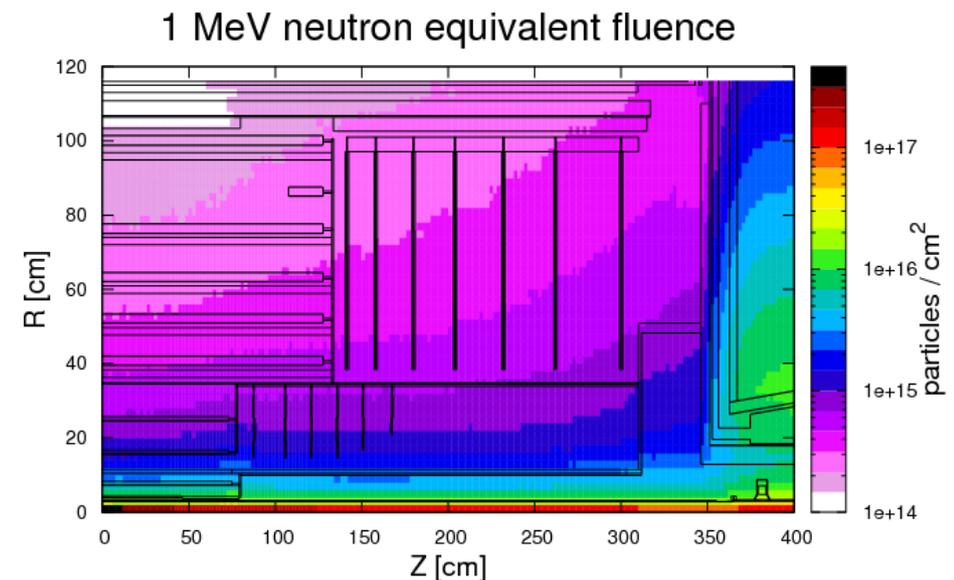
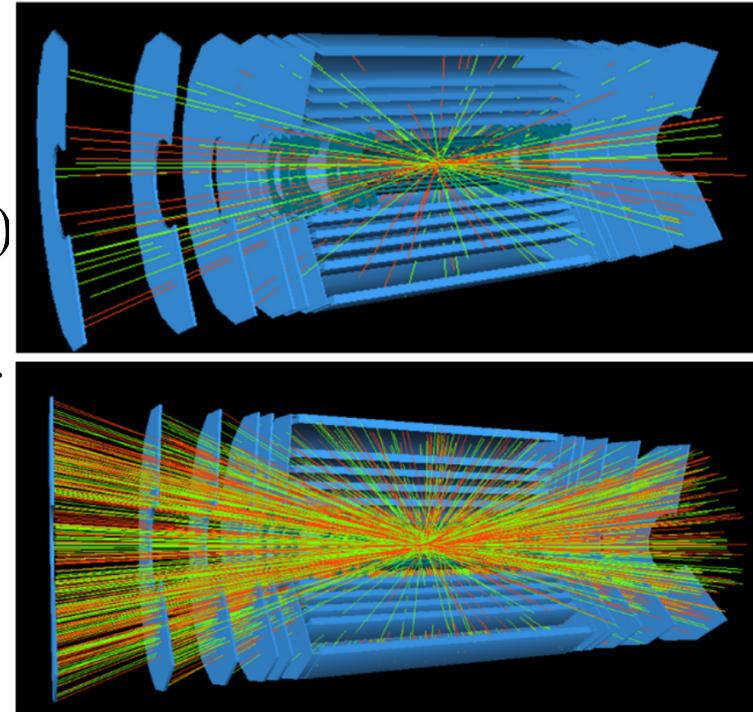
Upgrade du LHC : HL-LHC (1)

- ◆ **HighLuminosity-LHC** : augmentation de la luminosité
⇒ 10 fois plus de données (3000 fb^{-1})
- ◆ De 2030 à ~2040
 - installation en ~2027



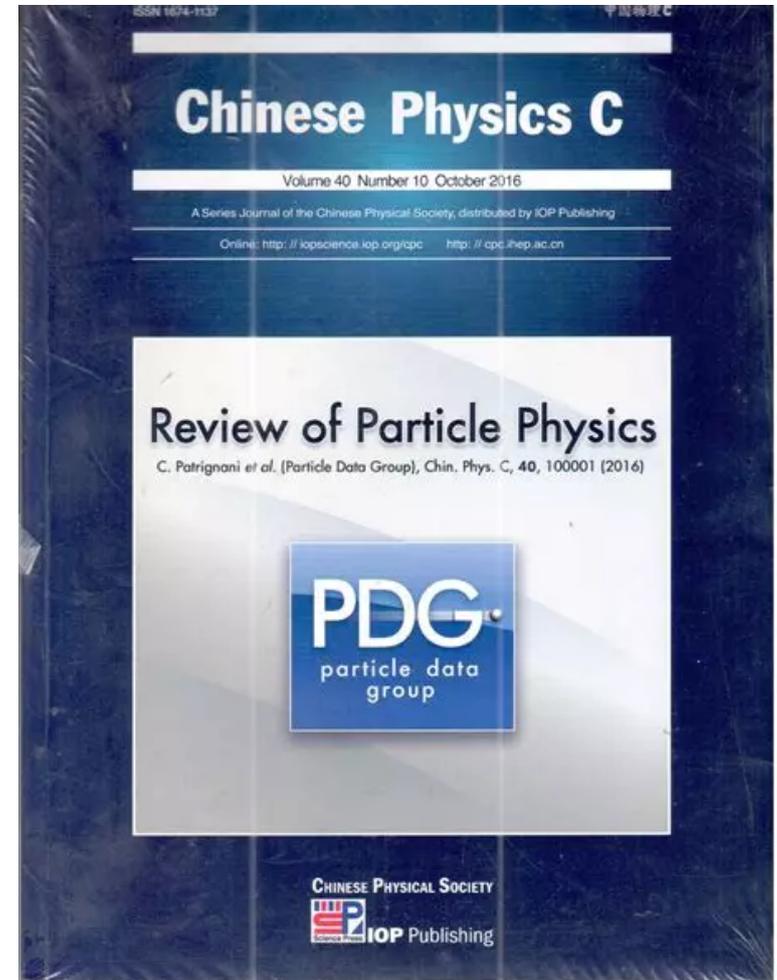
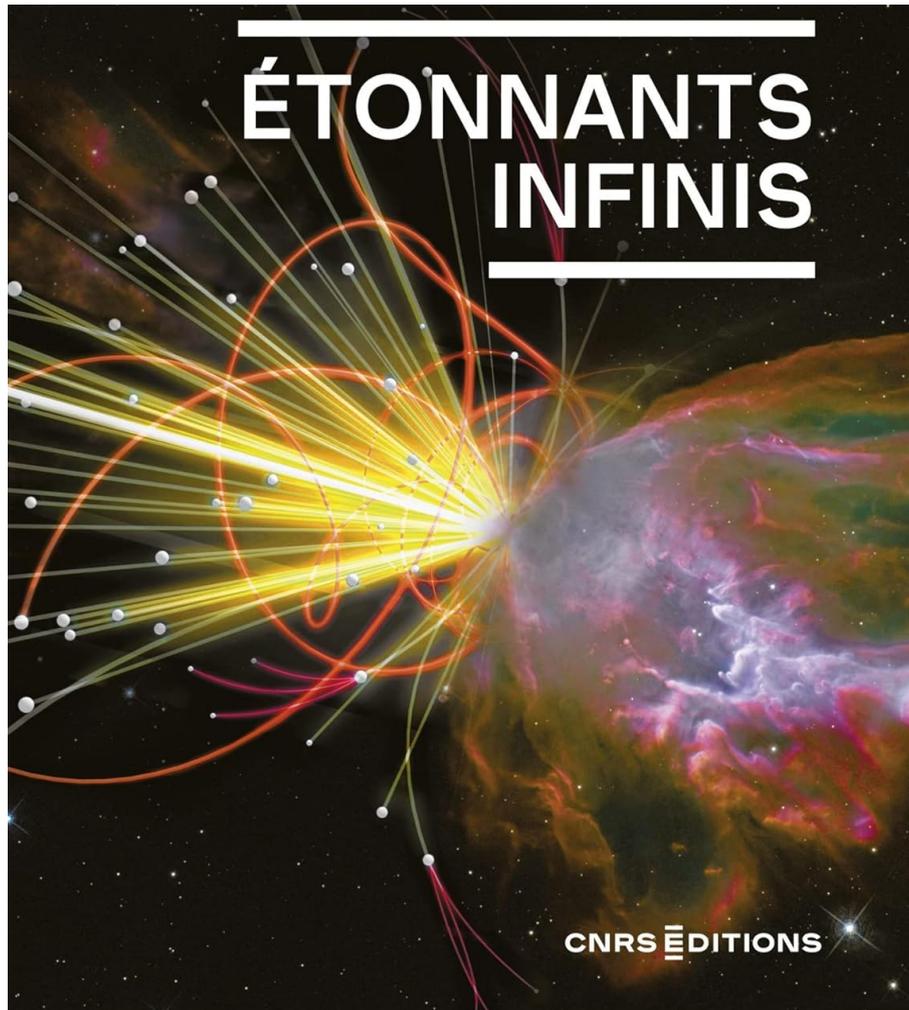
Upgrade du LHC : HL-LHC (2)

- ◆ Enjeux :
- ◆ 200 collisions par croisement de faisceau (pile-up)
 - design d'ATLAS/CMS: 25 collisions
 - nécessité d'un nouveau trajectographe interne pour maintenir les performances de reconstruction des traces et des vertex, l'étiquetage des quarks b, etc
- ◆ Beaucoup plus de radiations
 - dose de ionisation totale : 7.7 MGy
 - design d'ATLAS/CMS : 1.5 MGy
- ◆ Computing
 - traitement des données augmente avec le nombre d'interactions
 - stockage !



Conclusion

- ◆ Succès du projet LHC : accélérateur, détecteurs
- ◆ Quelques références :



“The Review of Particle Physics (2024)”,
Particle Data Group (lien)

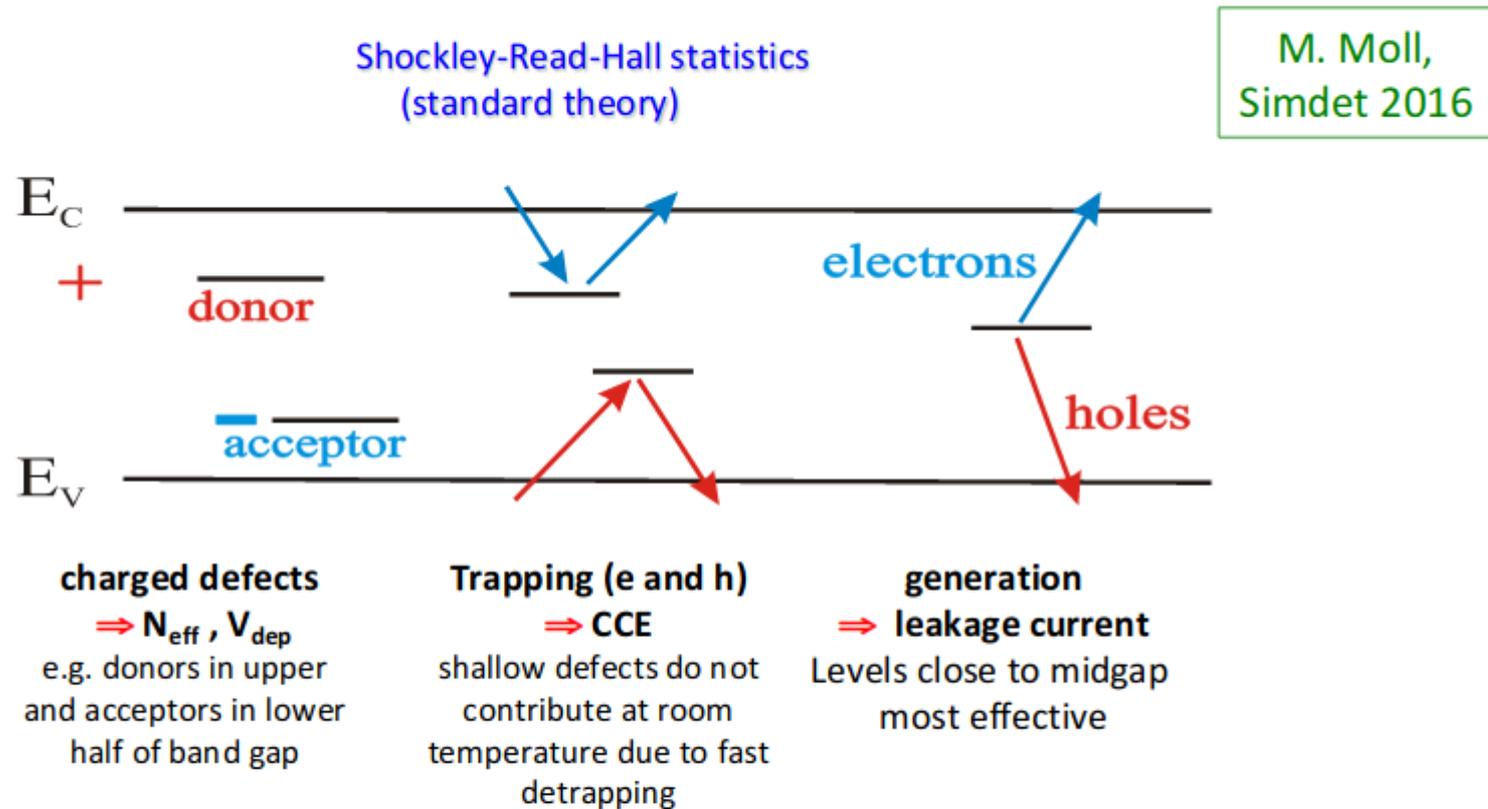
Back-up

Les puissances de 10

Power of ten	Number	Symbol
10^{-12}	0.000000000001	p (pico)
10^{-9}	0.000000001	n (nano)
10^{-6}	0.000001	μ (micro)
10^{-3}	0.001	m (milli)
10^{-2}	0.01	
10^{-1}	0.1	
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)
10^{15}	1 000 000 000 000 000	P (peta)

Dommmage des radiations

Radiation damage in silicon: microscopic level



Impact on detector properties can be calculated if all defect parameters are known:

$\sigma_{n,p}$: cross sections

ΔE : ionization energy

N_t : concentration

+ annealing...

Comparaison d'ATLAS et CMS

	ATLAS	CMS
Reconstruction efficiency for muons with $p_T = 1$ GeV	96.8%	97.0%
Reconstruction efficiency for pions with $p_T = 1$ GeV	84.0%	80.0%
Reconstruction efficiency for electrons with $p_T = 5$ GeV	90.0%	85.0%
Momentum resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 0$	1.3%	0.7%
Momentum resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 2.5$	2.0%	2.0%
Momentum resolution at $p_T = 100$ GeV and $\eta \approx 0$	3.8%	1.5%
Momentum resolution at $p_T = 100$ GeV and $\eta \approx 2.5$	11%	7%
Transverse i.p. resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 0$ (μm)	75	90
Transverse i.p. resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 2.5$ (μm)	200	220
Transverse i.p. resolution at $p_T = 1000$ GeV and $\eta \approx 0$ (μm)	11	9
Transverse i.p. resolution at $p_T = 1000$ GeV and $\eta \approx 2.5$ (μm)	11	11
Longitudinal i.p. resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 0$ (μm)	150	125
Longitudinal i.p. resolution at $p_T = 1$ GeV and $\eta \approx 2.5$ (μm)	900	1060

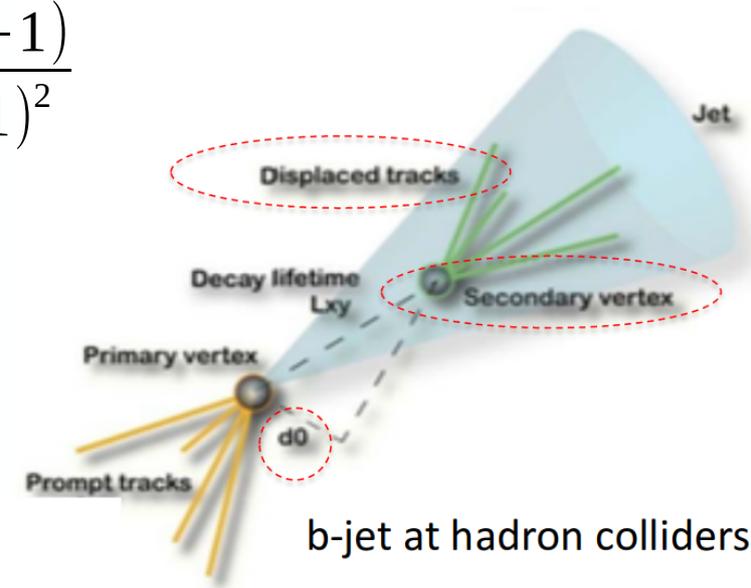
- ◆ Résolution de l'impulsion : CMS meilleur en moyenne
- ◆ Vertexing et étiquetage des b : similaire
- ◆ Efficacité : impact visible du champ magnétique et de la matière

Résolution des vertex

- ◆ Les mésons B (qui contiennent un quark b) décroissent au bout de qqs mm, on peut reconstruire le vertex du point de désintégration
- ◆ Résolution du paramètre d'impact :

$$\frac{\sigma_{d_0}}{d_0} \propto \frac{\sigma_y}{\sqrt{N}} \cdot \left(\frac{r}{L}\right) \sqrt{1 + \frac{12(N-1)}{N+1}} \oplus \theta_{MS} \cdot r_{PV} \cdot \sqrt{\frac{N(2N-1)}{6(N-1)^2}}$$

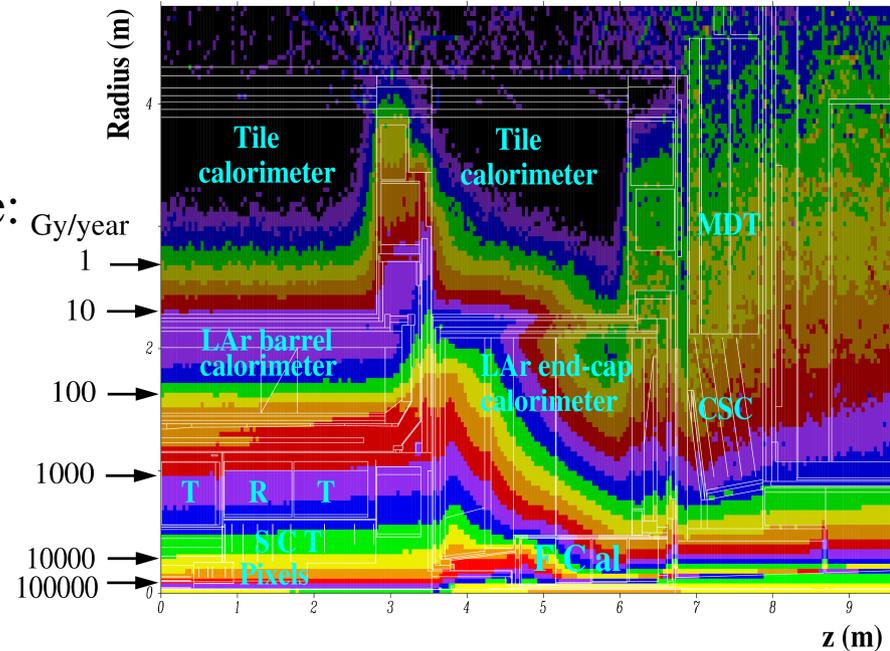
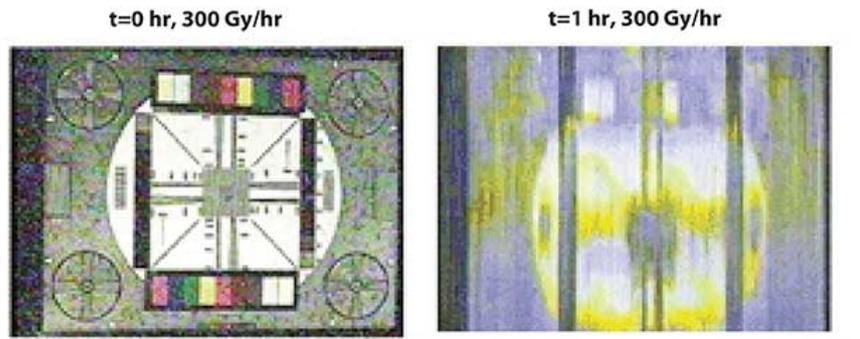
- N = nombre de points de mesure
- σ_y = précision sur la position du point de mesure
- L = longueur du détecteur
- r_{PV} = rayon de la première couche
- θ_{MS} = angle de diffusion multiple ($\propto x/X_0$)



- ◆ Pour améliorer la résolution sur le vertex déplacé :
 - améliorer la **précision sur la position**
 - avoir la **première couche le plus près possible** du point d'interaction
 - augmenter le **bras de levier**
 - diminuer la **matière**
 - NB: peu d'impact du nombre de couches

Dommages des radiations

- ◆ Dose recue par ATLAS par an :
 - pour comparaison, effet de 300 Gy (1 mois de LHC) sur un capteur CCD du commerce:



- ◆ Exemple d'effet sur le détecteur à pixels d'ATLAS :

