

L'expérience LHCb au LHC

JF Marchand

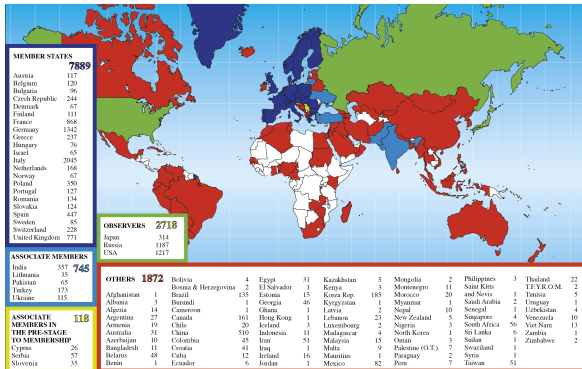
March 1, 2018

• Organisation européenne pour la recherche nucléaire

- Organisation internationale
- Créé en 1954
- 22 états membres
- $\approx$ 3300 employés
- $\approx$ 12000 utilisateurs
- $\approx$ 600 instituts
- $\approx$ 100 pays

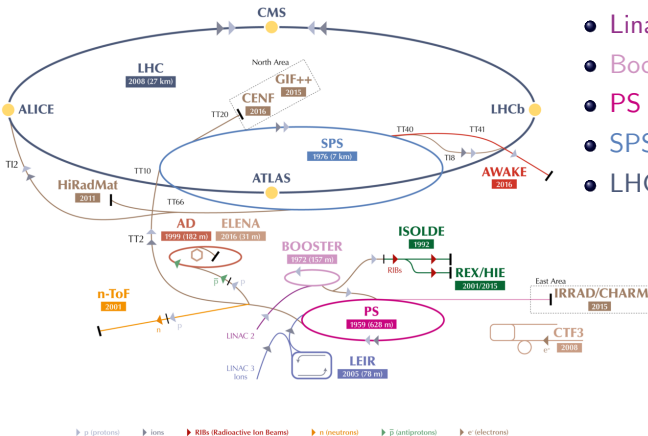


Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018



Le complexe d'accélérateurs du CERN

- Linac 50 MeV (31% c)
- Booster 1.4 GeV (92% c)
- PS 25 GeV (99.93% c)
- SPS 450 GeV (99.998% c)
- LHC 14 TeV (99.9999991% c)



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine REX/HIE Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight HiRadMat High-Radiation to Materials
 CHARM CERN High energy Accelerator Mixed field facility IRRAD proton IRRADiation facility GIF++ Gamma Irradiation Facility
 CENF CERN Neutrino platform

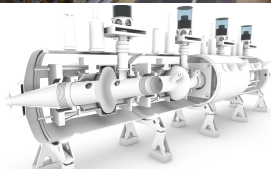
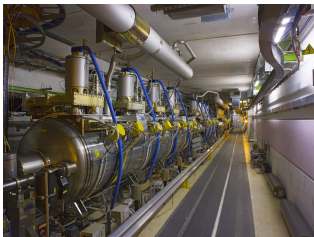
CERN Accelerator Complex - CERN-accpl-complex-2017

Le LHC et les faisceaux (1/2)

- Les faisceaux de protons sont accélérés par des **champs électriques**
- Ils sont maintenus sur la trajectoire courbée par des **champs magnétiques**

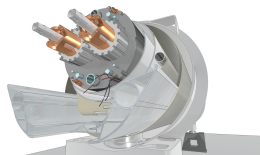
Champs électriques

- 8 cavités RF par faisceau



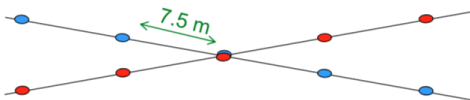
Champs magnétiques:

- 1232 dipôles → courbure
- 392 quadrupôles → focalisation



Le LHC et les faisceaux (2/2)

- Champs magnétique dans les dipôles: 8.3T ($\approx 200\,000\times$ le champ magnétique terrestre)
- Technologie supraconductrice, He à -271.3°C (1.9K): Plus froid que l'espace intersidéral (2.7K)
- Vide extrême dans l'enceinte des faisceaux: 10x plus poussé que sur la lune



- 2808 paquets de protons par faisceau
- 100 milliards de protons par paquet
- 11245 tours par seconde
- Epaisseur d'un paquet: $\approx 1\text{mm} \rightarrow 20\mu\text{m}$ aux points de collision (1/2 cheveu)
- Energie de chaque faisceau: 7 TeV (pour l'instant 6.5)
 - $1\text{TeV} = 1\text{ Tera électron-Volt} = 10^{12}\text{ eV}$ (énergie d'un moustique en vol)
 - Energie concentrée dans un espace 10^{12} fois plus petit qu'un moustique
 - Énergie du faisceau : $\approx$ TGV à 150 km/h

- **D'où viennent les protons?**

- Bouteille de H_2
- H possède 1 électrons et 1 proton
- On utilise un champ électrique pour "casser" les molécules de gaz et extraire les constituants p^+ et e^-

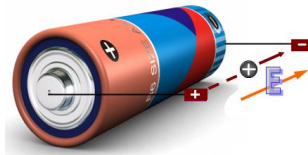


- 2808 bunches $\times 1.15 \cdot 10^{11} = 3 \cdot 10^{14}$ protons par faisceau
soit $6 \cdot 10^{14}$ protons pour les 2 faisceaux
- 1cm^3 de H_2 gazeux contient $n = 4 \cdot 10^{-5}$ moles, $PV = nRT$ avec $\begin{cases} P = 10^5 \text{ Pa} \\ V = 10^{-6} \text{ m}^3 \\ T = 293 \text{ K} \end{cases}$
soit $N = 4 \cdot 10^{-5} \times 6 \cdot 10^{23} = 2.4 \cdot 10^{19}$ molécules
⇒ Environ $5 \cdot 10^{19}$ atomes d'hydrogène !!!
⇒ $\approx 100\,000$ remplissages du LHC
⇒ 1 ou 2 remplissage par jour... donc ≈ 100 ans
- Une bouteille contient environ 5kg de gaz, soit 2500 moles, soit 3×10^{27} atomes d'hydrogène $\rightarrow 4 \cdot 10^9$ années !!

Que'est-ce qu'un 'eV' ?

- 1 eV est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 V, dans le vide

- $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$



- Une pile de 1.5V fournit une énergie de 1.5 eV à chaque électron
- Un tube cathodique de TV fournit des électrons de $\approx 20 \text{ keV}$

- On utilise $E = mc^2$ pour transformer les eV en kg

$$1 \text{ eV}/c^2 = \frac{1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}}{(299\,792\,458 \text{ m/s})^2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ J} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

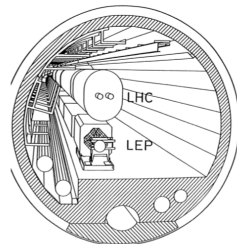
- Par simplicité on utilise les "unités naturelles" ($c = 1$) et les masses sont exprimées en 'eV'

$$\begin{cases} m_{\text{electron}} = 0,5110 \text{ MeV} \\ m_{\text{proton}} = 0,9383 \text{ GeV} \\ m_{\text{neutron}} = 0,9396 \text{ GeV} \end{cases}$$

Histoire du LHC (1/2)

- **Mars 1984:** 1^{ère} reconnaissance officielle du concept du LHC
- **16 décembre 1994:** Projet approuvé
- **1997 - 1998:** Approbation des 4 expériences
- **Novembre 2000:** Arrêt et démantèlement du LEP et début de construction du LHC
- **7 mars 2005:** 1^{er} dipôle dans le tunnel

ECFA 84/81
CERN 84-10
5 September 1984



LARGE HADRON COLLIDER
IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

held at Lausanne and Geneva,
21-27 March 1984

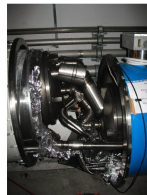


Histoire du LHC (2/2)

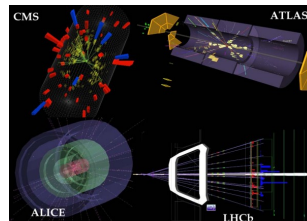
- **10 septembre 2008:** Circulation du 1^{er} faisceau



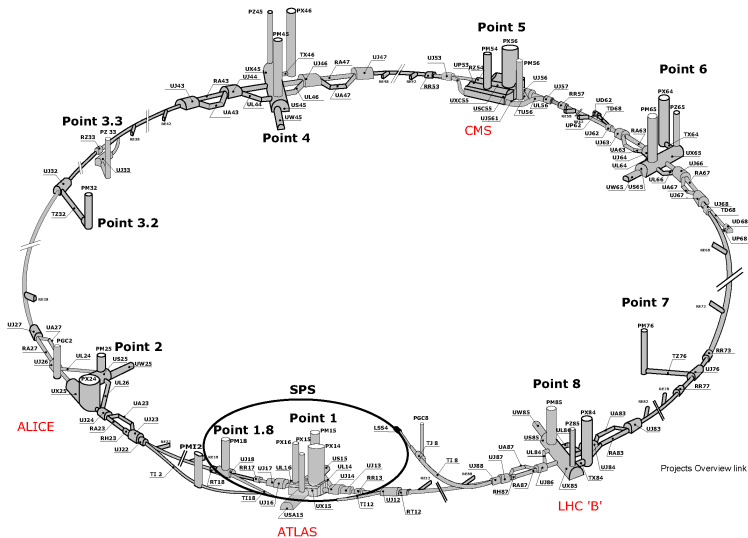
- **19 septembre 2008:** Défaillance d'une connexion électrique entre un dipôle et un quadripôle



- **23 octobre 2009:** Redémarrage !!
- **23 novembre 2009:** 1^{ères} collisions à 900 GeV
- **30 mars 2010:** Collisions à 7 TeV
- **5 avril 2012:** Collisions à 8 TeV
- **20 mai 2015:** 1^{ères} collisions à 13 TeV

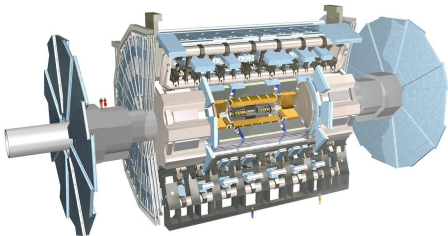


Vue d'ensemble du LHC

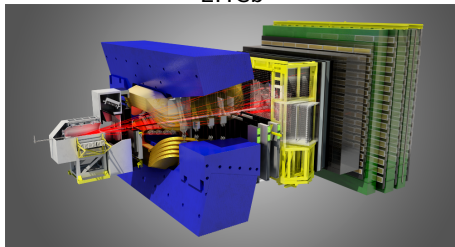


Les expériences du LHC

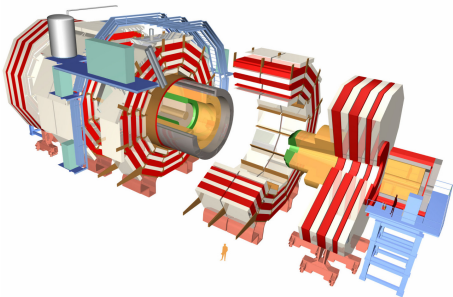
ATLAS



LHCb

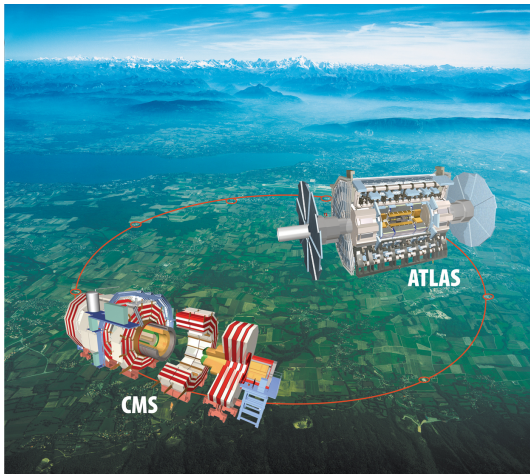


CMS



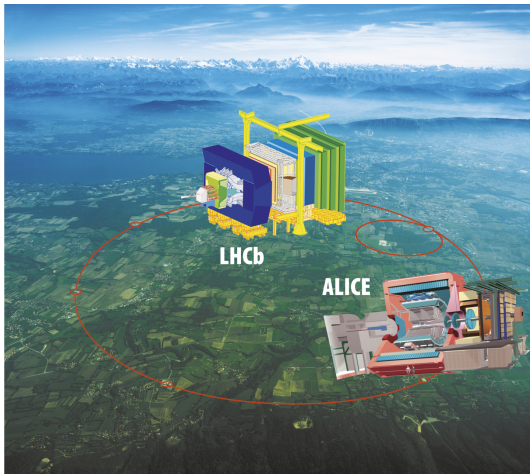
ALICE





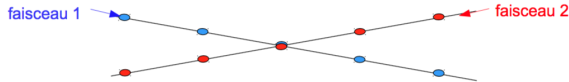
- 2 expériences « généralistes »
 - **ATLAS**: 46×22 m, 7000 t
 - **CMS**: 21×15 m, 14 000 t
(≈ 3000 physiciens chacune)

Buts: recherche du boson de Higgs, découverte de nouvelles particules

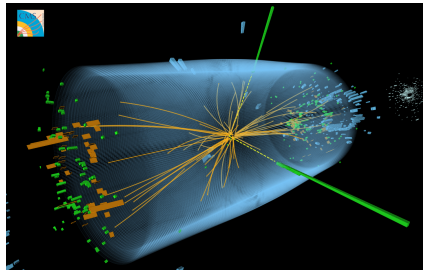
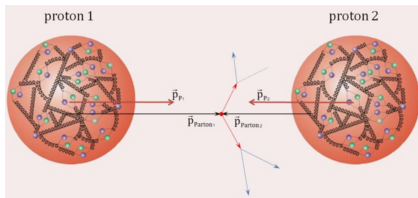


- **ALICE:** 26×16 m, 10 000 t
But: Collisions plomb-plomb pour étudier le plasma quark-gluon (≈ 1000 physiciens)
- **LHCb:** $21 \times 10 \times 13$ m, 5 600 t
But: Etude de la physique du quark *b* et *c* (≈ 1000 physiciens)

Les collisions au LHC



- 40 millions de croisement par seconde
- Plusieurs collisions de protons par croisement
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision $\Rightarrow$ Mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

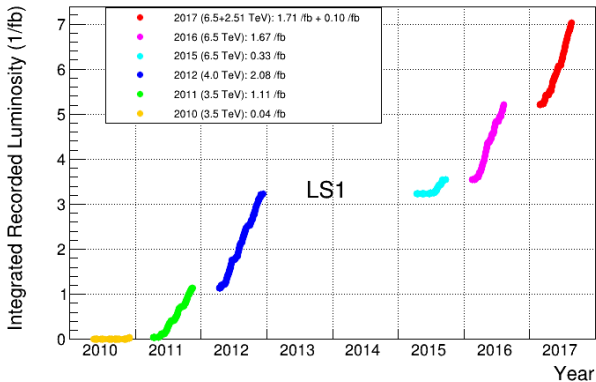


Prise de données (1/2)

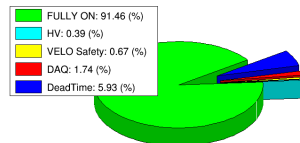
- Le LHC fonctionne 24h/24, 7j/7 pour accumuler le maximum de statistique
- Arrêt en hiver (consommation du CERN $\approx 1/3$ de celle du canton de Genève...)
- Les physiciens se relayent (3×8 h) dans les salles de contrôle pour assurer le bon fonctionnement des détecteurs



LHCb Cumulative Integrated Recorded Luminosity in pp, 2010-2017

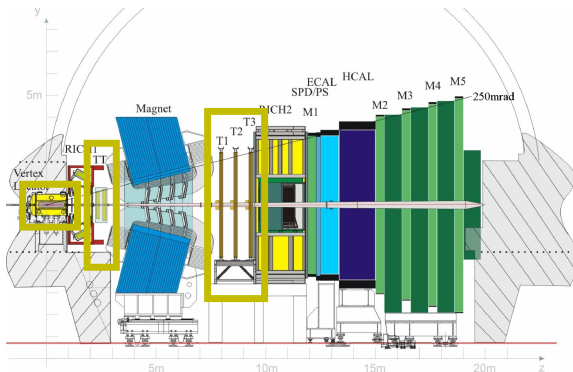


LHCb Efficiency breakdown in 2017



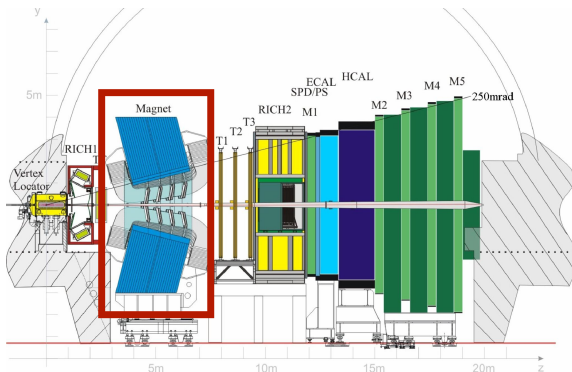
La détection de particules

- Des centaines de particules sont créées à chaque collisions
- Pour chacune d'elle, on veut savoir:
 - La trajectoire → **détecteurs de traces** (pour les particules chargées)
 - L'impulsion → **champ magnétique** (pour les particules chargées)
 - L'énergie → **calorimètres**
 - La masse → **détecteurs de muons, effets cherenkov**



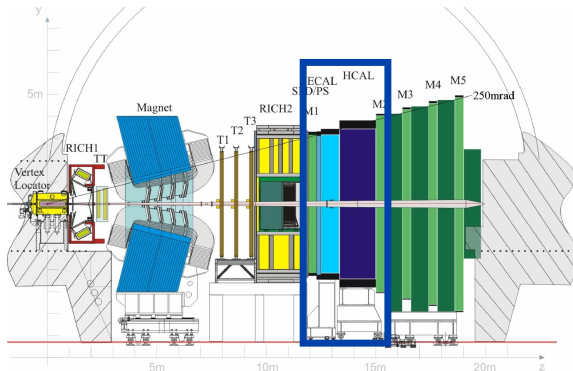
La détection de particules

- Des centaines de particules sont créées à chaque collisions
- Pour chacune d'elle, on veut savoir:
 - La trajectoire → **détecteurs de traces** (pour les particules chargées)
 - L'impulsion → **champ magnétique** (pour les particules chargées)
 - L'énergie → **calorimètres**
 - La masse → **détecteurs de muons, effets cherenkov**



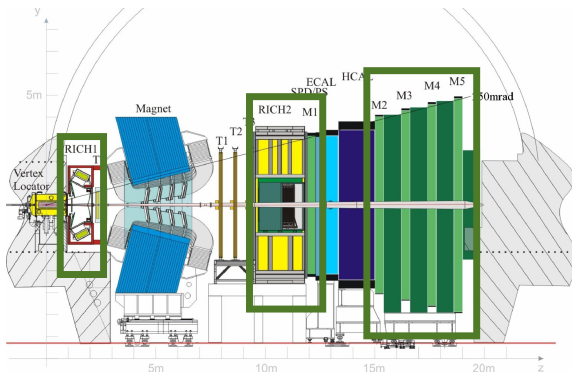
La détection de particules

- Des centaines de particules sont créées à chaque collisions
- Pour chacune d'elle, on veut savoir:
 - La trajectoire → **détecteurs de traces** (pour les particules chargées)
 - L'impulsion → **champ magnétique** (pour les particules chargées)
 - L'énergie → **calorimètres**
 - La masse → **détecteurs de muons, effets cherenkov**

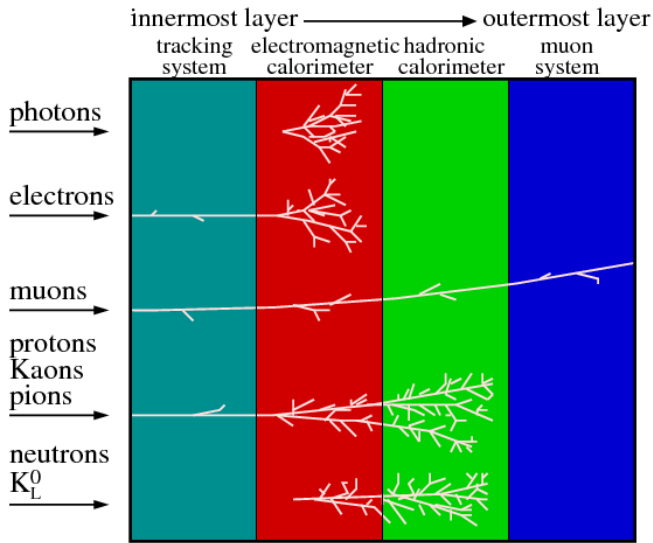


La détection de particules

- Des centaines de particules sont créées à chaque collisions
- Pour chacune d'elle, on veut savoir:
 - La trajectoire → **détecteurs de traces** (pour les particules chargées)
 - L'impulsion → **champ magnétique** (pour les particules chargées)
 - L'énergie → **calorimètres**
 - La masse → **détecteurs de muons, effets cherenkov**

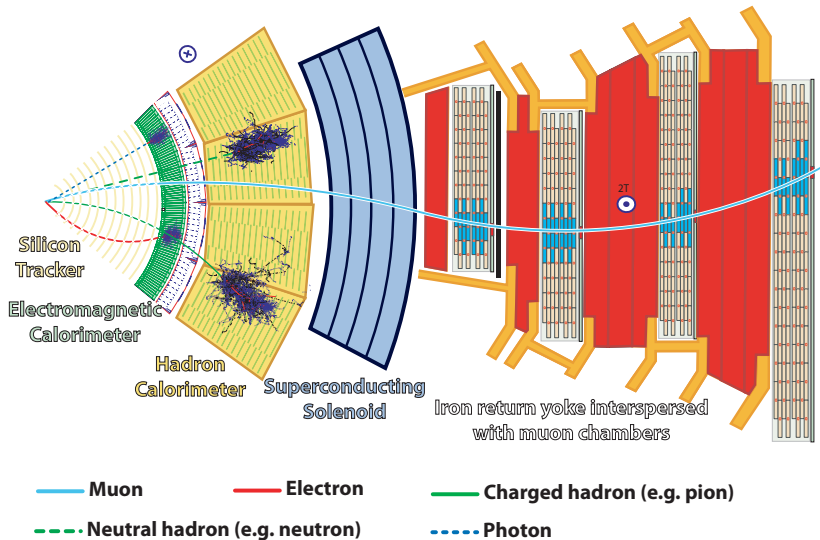


Un détecteur ordonné



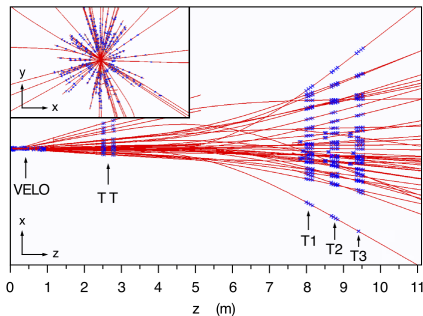
C. Lippmann - 2003

Un détecteur ordonné



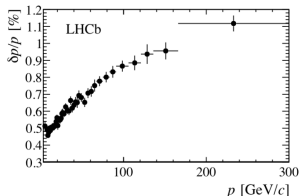
Mesure de l'impulsion, reconstruction de vertex

VELO

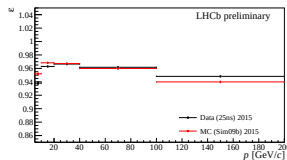


- Efficacité de reconstruction des traces: $\approx 96\%$
- Résolution sur l'impulsion: $\approx 0.5\%$

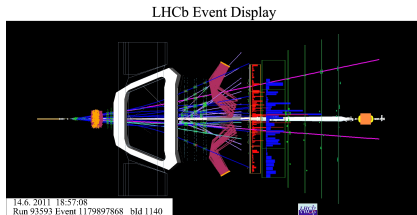
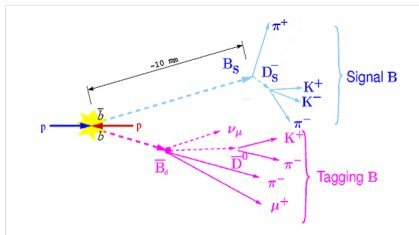
Résolution sur l'impulsion



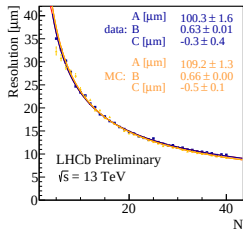
Efficacité de reconstruction des traces



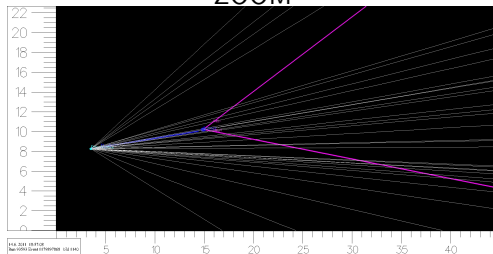
Reconstruction des vertex primaires et secondaires



Résolution sur la position en z du vertex primaire

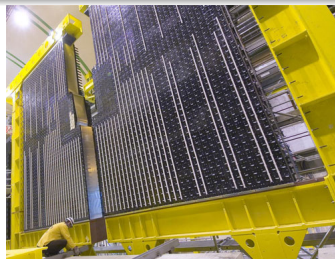
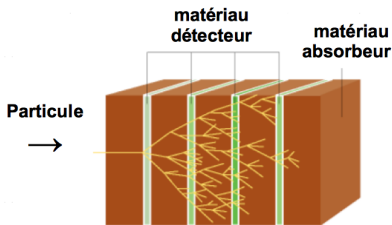
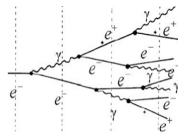


ZOOM



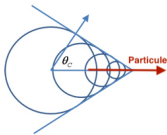
Mesure de l'énergie avec les calorimètres

- La mesure de l'énergie des particules se fait dans des milieux très denses et instrumentés: les **calorimètres**
- **Mesure destructive**: Les particules y déposent toute leur énergie (sauf μ et ν)
- Sandwich de matériaux
 - **Absorbeurs**: Milieux denses où les particules interagissent
 - **Détecteurs**: Comptage de particules secondaires, signal proportionnel à la perte d'énergie
- **Calorimètre électromagnétique**: Stoppe les particules électromagn. (γ , $e^\pm$)
- **Calorimètre hadronique**: Stoppe les particules constituées de quarks (p , n , π)



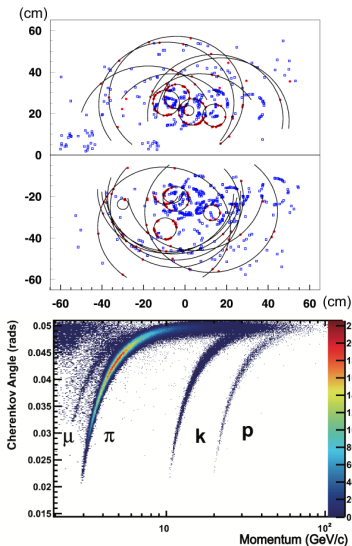
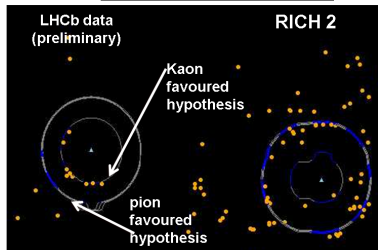
Identification des particules avec les RICHs

- **Effet Cherenkov:** Lorsqu'une particule va plus vite que la lumière dans un milieu d'indice n , elle émet des photons



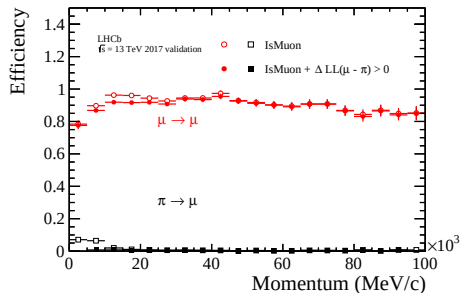
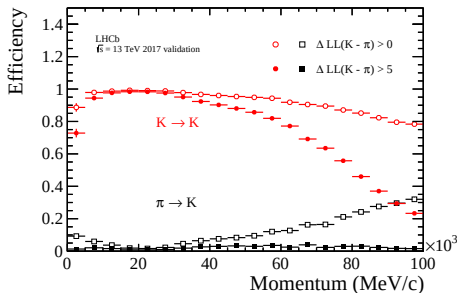
$$\theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\beta n} \right) \text{ avec } \beta = v/c$$

et
$$m^2 c^2 = \frac{1 - \beta^2}{\beta^2} p^2$$



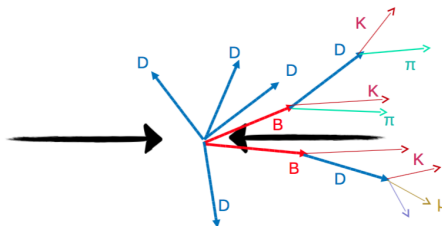
Est-on certain du type de particule observé?

- **Non**, on est jamais sûr à 100% → **Mis-identification possible**
- L'efficacité d'identification peut être évaluée et dépend par exemple de l'impulsion de la particule

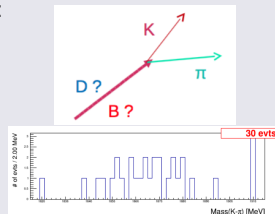


Et ensuite?

- On a identifié et mesuré toutes les particules stables
- Comment déterminer leur origine? Viennent-elles d'un B ? D'un D ?

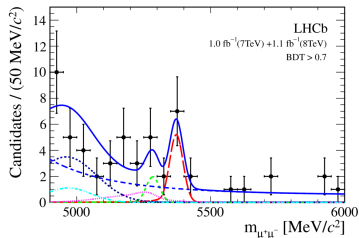


- Avec les énergies et impulsions mesurées, on reconstruit des masses invariantes
- Exemple sur lequel vous travaillerez cet après-midi:
 - On cherche les paires de K et de π
 - On calcule la mass invariante de la paire $m_{K\pi}$
 - On place la masse sur un graphique en barre, chaque entrée correspond à une paire ($K\pi$)
→ **Il faut accumuler beaucoup d'évènements pour faire des mesures précises (statistique)**

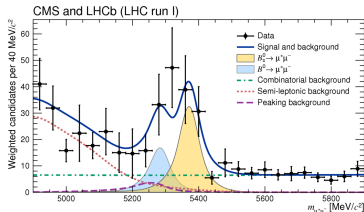


Deux exemples pour finir

Recherche de $B_s^0 \rightarrow \mu\mu$ dans LHCb



Et en combinant les résultats de LHCb et CMS



$\Rightarrow 1^{\text{ère}}$ observation

Découverte du boson de Higgs dans ATLAS

