

COMPRENDRE L'INFINIMENT PETIT



Anne-Isabelle Etienvre
(anne-isabelle.etienvre@cea.fr)



- Les particules, leurs interactions

- Mise en évidence expérimentale
 - ▣ *Les détecteurs de physique des particules*
 - ▣ *L'accélérateur LHC*

- Le boson de Higgs

3

Episode 2

Mise en évidence expérimentale

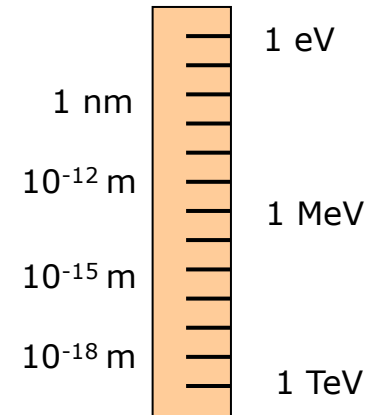


La course aux hautes énergies

- **Dualité onde-corpuscule**

- ▣ *Toutes les particules ont un comportement ondulatoire, caractérisé par une longueur d'onde λ :*

$$\lambda \propto \frac{1}{p}$$



- ▣ *Plus la matière est étudiée à petite échelle, plus l'énergie nécessaire pour y parvenir doit être élevée.*

- **Création de particules de plus en plus lourdes**

- ▣ $E = mc^2$

- **Se replacer dans les conditions du Big-Bang**

- ▣ $t \sim 0.7 (1 \text{ MeV} / E)^2 \text{ s}$



La course aux hautes énergies

- **Jusque dans les années 30:**

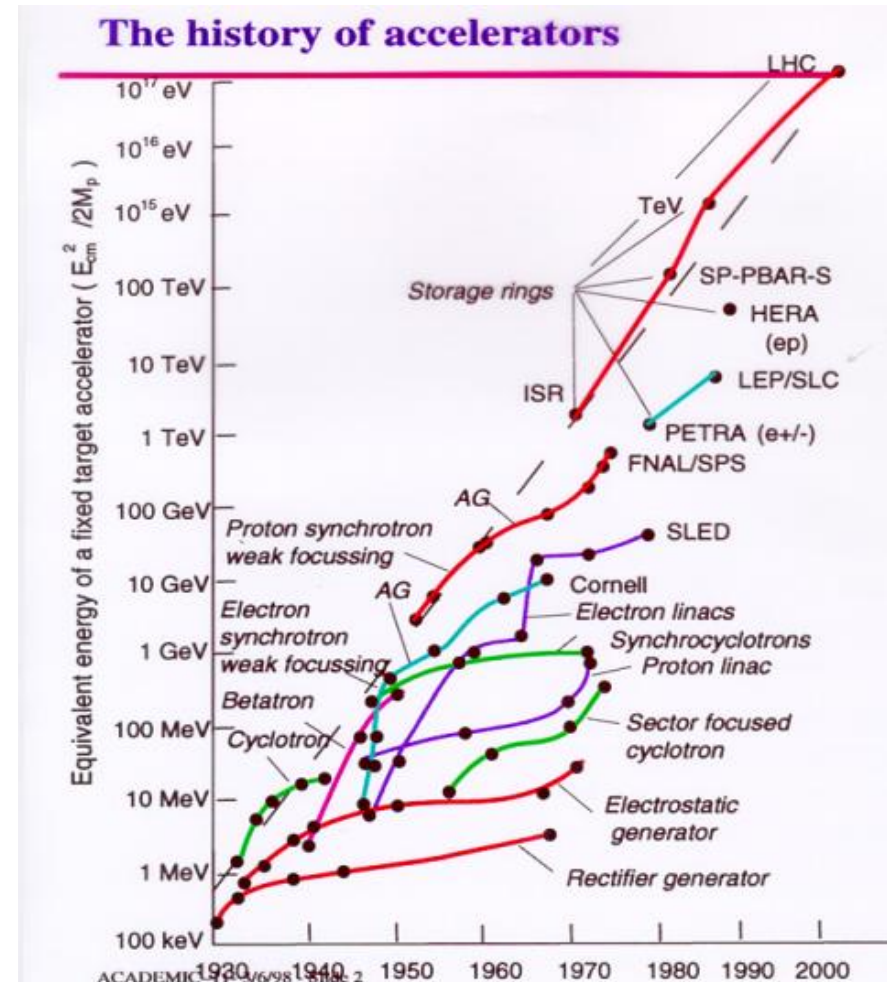
- ▣ *Rayons cosmiques*
- ▣ *Sources radioactives*

- **1930 :**

- ▣ *Premier cyclotron*
 - Berkeley

- **Depuis:**

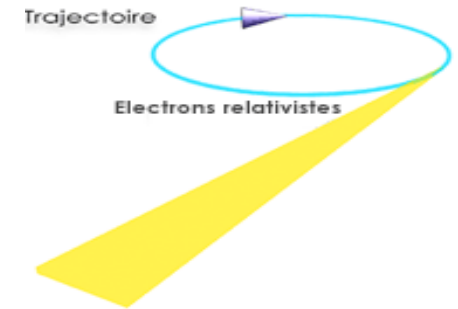
- ▣ *Accélérateurs*
 - *Energie croissante*
 - * 10^6 entre 1930 et aujourd'hui





Design d'un accélérateur

- **Les choix technologiques, si on veut produire beaucoup d'événements à haute énergie**
 - *Collisionneur ou cible fixe?*
 - $E_{cm} = E_{f1} + E_{f2}$ vs $E_{cm} \propto \sqrt{E_f} \Rightarrow$ collisionneur
 - *Circulaire ou linéaire?*
 - $E_f \propto$ nb de passages dans des cavités accélératrices \Rightarrow quand on peut circulaire.
 - *Quelles particules?*
 - leptons (collisions « propres » avec bilan énergie-impulsion possible mais perte par rayonnement synchrotron, au LEP pour un faisceau de 100 GeV, 3.6 GeV par tour!)
 - ou hadrons (mais bilan seulement dans le plan transverse).
 - Collisions proton-antiproton (un seul anneau mais antiprotons très durs à obtenir) ou collisions proton-proton (deux anneaux!)





Design d'un accélérateur

□ Taille?

- Le plus grand rayon de courbure possible (perte par rayonnement).

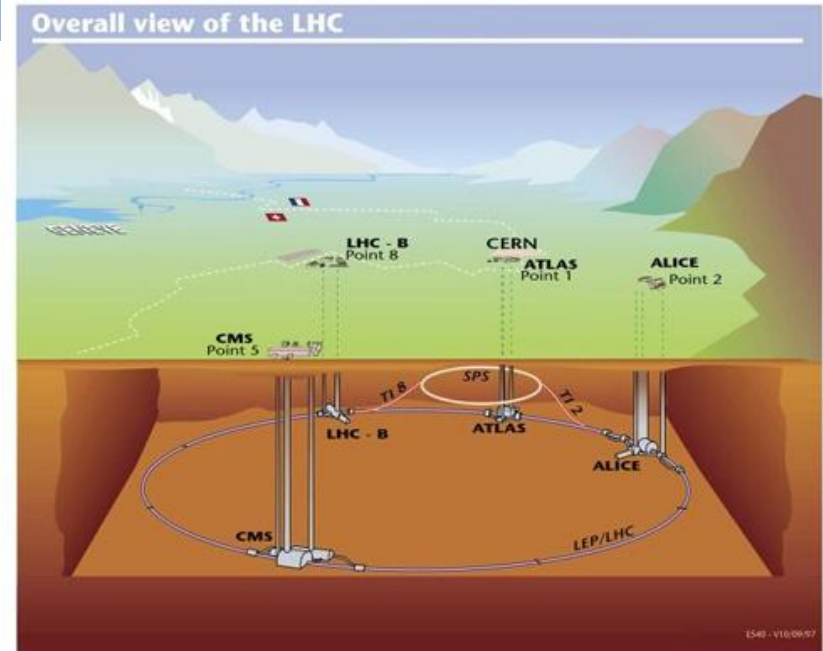
Pour le tunnel au CERN coincé entre le Léman et le Jura ⇒

27 km de circonférence.

E_{\max} proportionnelle au rayon de courbure et au champ magnétique donc limitée par B_{\max} dans les aimants de courbure.

□ Le plus grand champ possible :

- Aimants supraconducteurs.





Design d'un accélérateur

□ *Intensité:*

- Le taux d'interactions intéressantes vaut

$$\mathcal{L} \times \sigma$$

soit la luminosité \mathcal{L} (dépend de la machine) fois la section efficace σ (dépend du processus regardé)

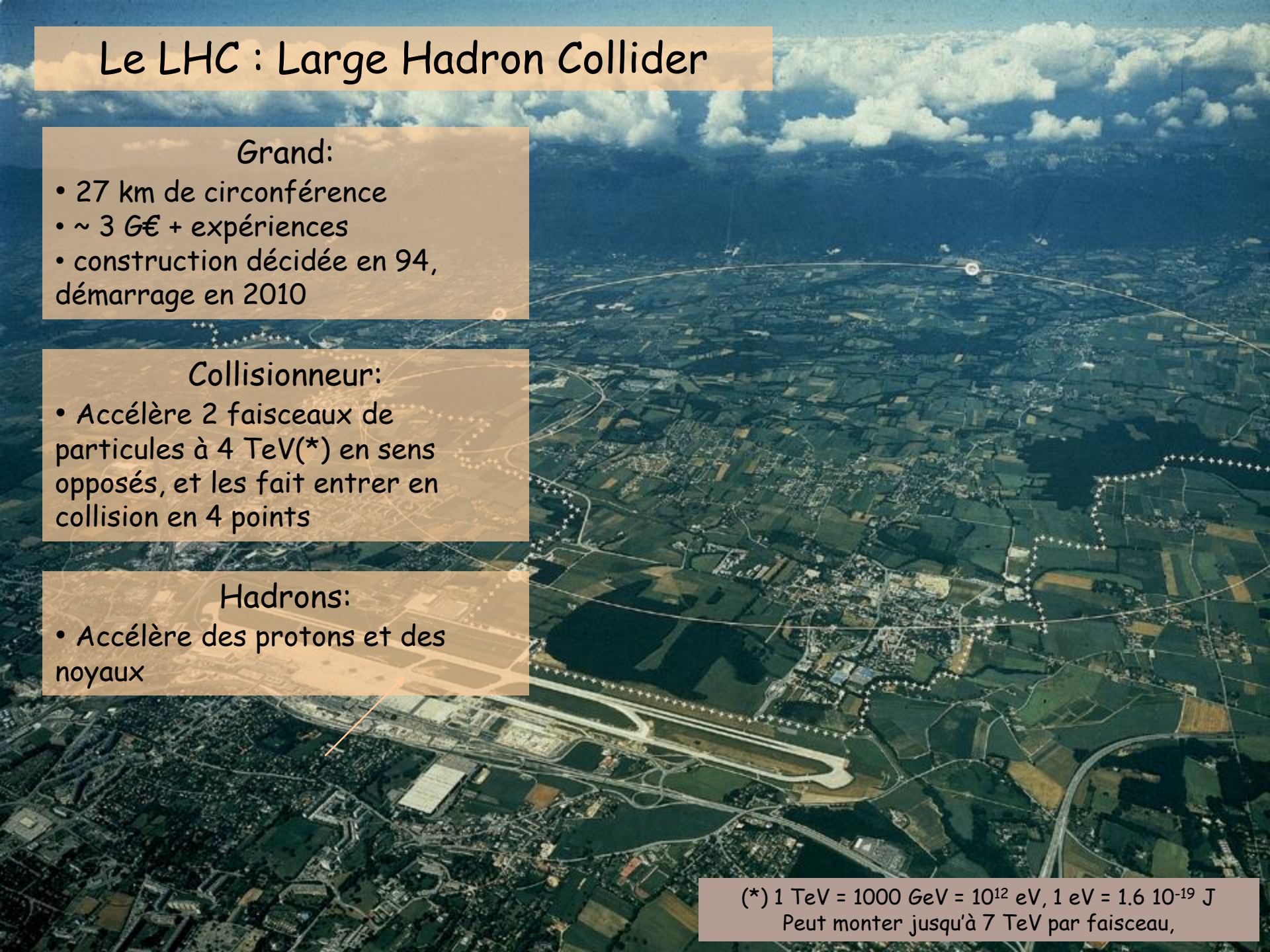
- L'accélérateur doit fournir la luminosité la plus grande:

$$\mathcal{L} = (f \times n_1 \times n_2) / (4\pi \sigma_x \sigma_y)$$

- Fréquence f de révolution la plus grande possible, nombre de paquets de particules le plus grand possible et le plus de particules possible par paquet), région d'interaction la plus petite possible (focalisation).

Le LHC constitue un exemple actuel de collisionneur performant (fournissant la plus grande énergie jamais délivrée dans le monde)

Le LHC : Large Hadron Collider

An aerial photograph of the LHC tunnel in a rural landscape. The tunnel is a long, thin, light-colored structure that winds through the fields. A semi-transparent diagram is overlaid on the image, showing the circular path of the LHC and the four collision points. The diagram consists of a large circle with four small circles at the intersections of the horizontal and vertical diameters. The background shows a mix of green fields, brown patches, and some buildings.

Grand:

- 27 km de circonférence
- ~ 3 G€ + expériences
- construction décidée en 94, démarrage en 2010

Collisionneur:

- Accélère 2 faisceaux de particules à 4 TeV(*) en sens opposés, et les fait entrer en collision en 4 points

Hadrons:

- Accélère des protons et des noyaux

(*) 1 TeV = 1000 GeV = 10^{12} eV, 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J
Peut monter jusqu'à 7 TeV par faisceau,



Le LHC

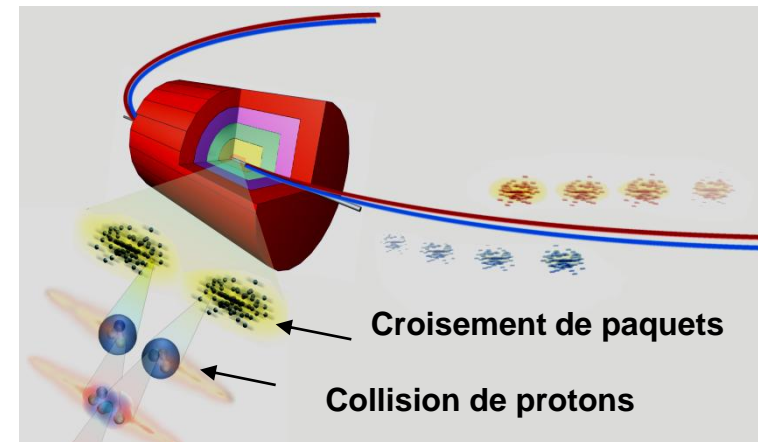
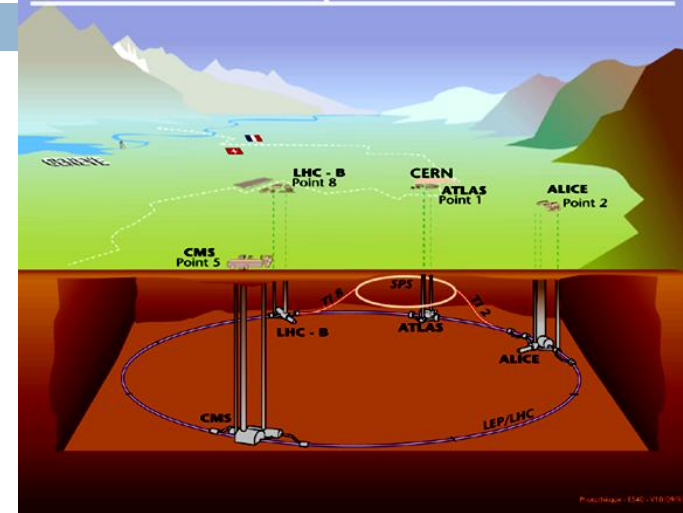
Le LHC (CERN)

Collisionneur proton-proton

- Un détecteur à chacun des 4 points de collision des protons
- 2 permettent la recherche du boson de Higgs: ATLAS et CMS

En régime nominal:

- 10^{11} protons/paquet [$7 \text{ cm} \times (15 \mu)^2$]
- 2835 paquets/faisceau
- Fréquence des collisions: 40 MHz





Le LHC au fil du temps

80's idée : machine de découverte dans le domaine du TeV

84 Lausanne : coup d'envoi officiel

94 approbation par le conseil du CERN

96-98 approbation des 4 expériences

98 dipôle test à 8.33T. **Début génie civil**

01 tunnels de transfert

02 dernier morceau du LEP (40 000t en 14 mois)

03 livraison dernier « frigo » à 4.5K

05 fin génie civil, descente premier dipôle
1^{ère} interconnexion, 1^{er} secteur cryogénique

06 centre contrôle du CERN
tout le « frigo », aimants finis, 1^{er} octant OK

07 refroidissement octant secteur 7-8 à 1.9K,
dernier dipôle installé
connexion dernier octant (1-2)
dernières connexions / 123000!

10 Sept 2008 premiers faisceaux circulent dans
la machine

19 Sept 2008 incident

Nov 2009 premières collisions!

900 GeV dans le centre de masse

Mars 2010: montée à 7 TeV

Printemps 2012: montée à 8 TeV

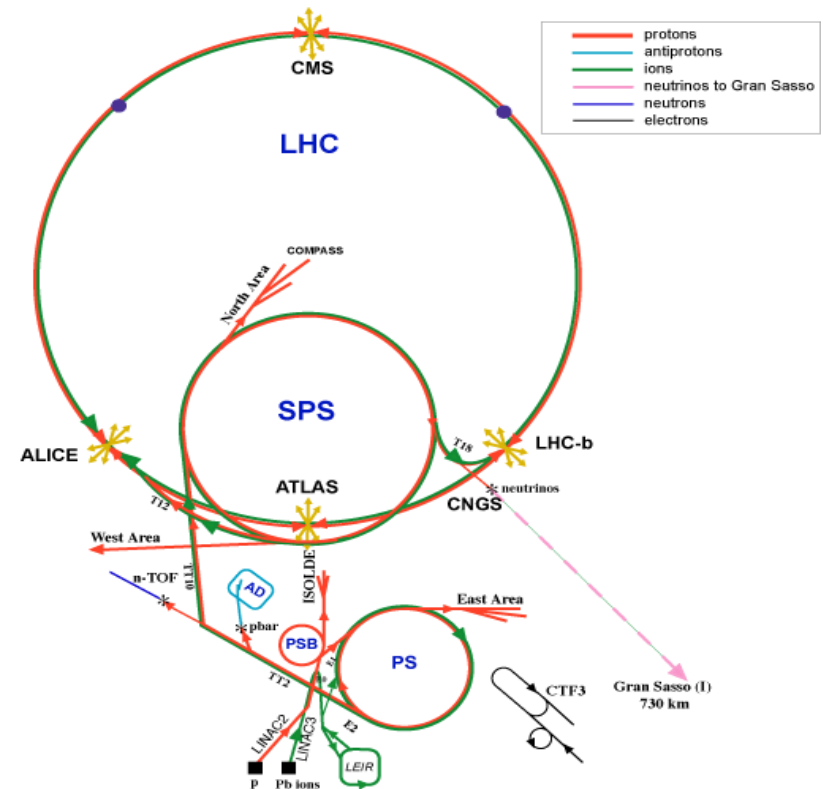




Le complexe d'accélérateurs au CERN

□ LHC = Dernier étage, « Seulement » de 450GeV à 7TeV

- H « dépiauté » de ses électrons injecté dans le Linac2 à $1/3 c$
- Injecteur (157m de circ.) amène les protons à $91.6\% c$
- PS (628m de circ.) amène les p à $99.9\% c$
- SPS (7km de circ.) amène les protons à 450 GeV
- Deux points d'injection pour avoir deux faisceaux de protons circulant en sens inverses. Temps de remplissage : 4minutes 20 s par anneau
- Le LHC donne l'accélération finale en 20 mn





Les aimants du LHC

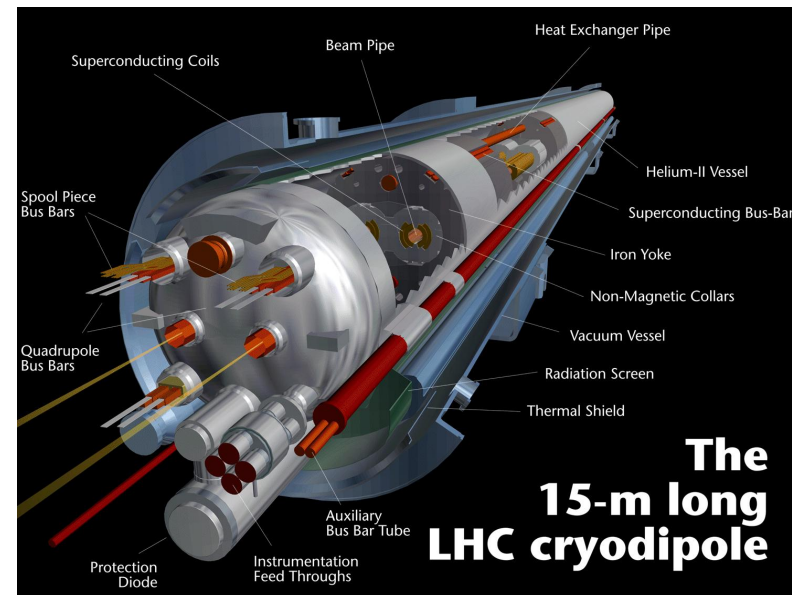
- Pour maintenir les particules sur leur trajectoire:
 - 400 aimants de focalisation et 1232 aimants de courbure (dipôles)
- But de ces derniers: faire tourner des particules de 7 TeV dans un tunnel de 27 km:

$$E = 0.3 \times B \times R \quad (E \text{ en TeV}, B \text{ en Teslas}, R \text{ en km})$$

$$\rightarrow B = 5.4 \text{ T} \quad (\text{champ magnétique terrestre} \sim 50 \mu\text{T})$$

(en réalité seulement 22 km de sections courbes remplies à 80 % \rightarrow 8.3 T)

\rightarrow (Electro) Aimants supraconducteurs

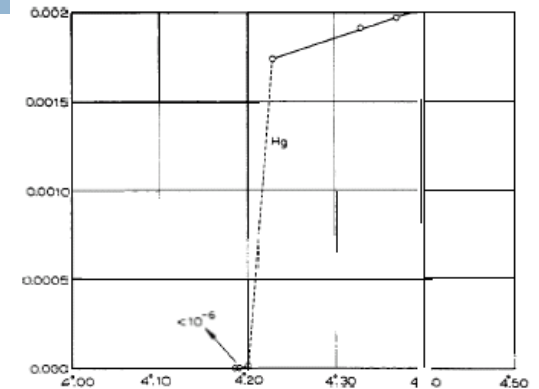




Les aimants supraconducteurs

- **Supraconductivité:**

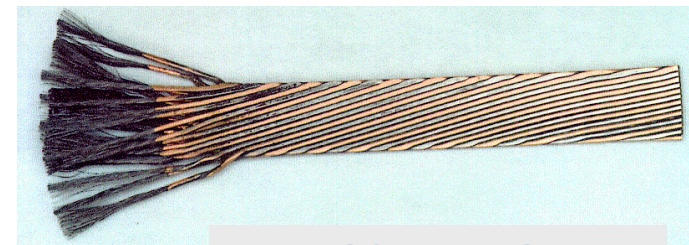
- ▣ Découverte en 1911 par H.K. Onnes pour le mercure
- ▣ Propriété de certains matériaux de présenter une résistivité nulle en dessous d'une certaine température → on peut y faire passer un courant très intense (→ grand champ magnétique)



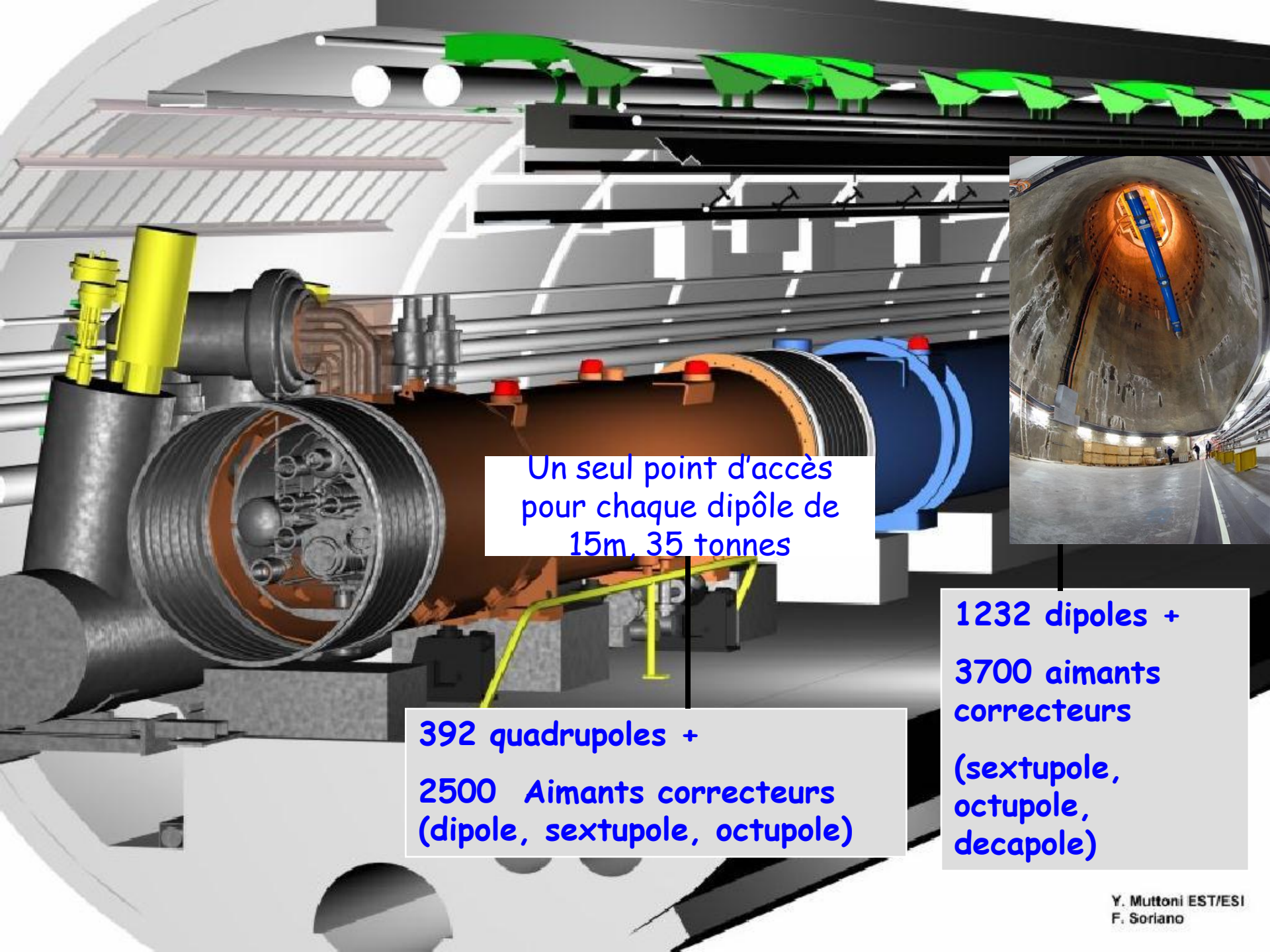
Thus the mercury at 4.2°K has entered a new state, which, owing to its particular electrical properties, can be called the state of superconductivity.

- **Difficultés:**

- ▣ Basses températures (moins de 5K = -268° C)
→ cryostats, cryogénie
- ▣ Courants importants = forces magnétiques énormes, énergie stockée énorme
- ▣ 10.4 GJ (\approx A 380 @ 700 km/h)



Câble LHC
(largeur = 1.5 cm,
épaisseur ~ 1.5 mm)



Un seul point d'accès
pour chaque dipôle de
15m, 35 tonnes

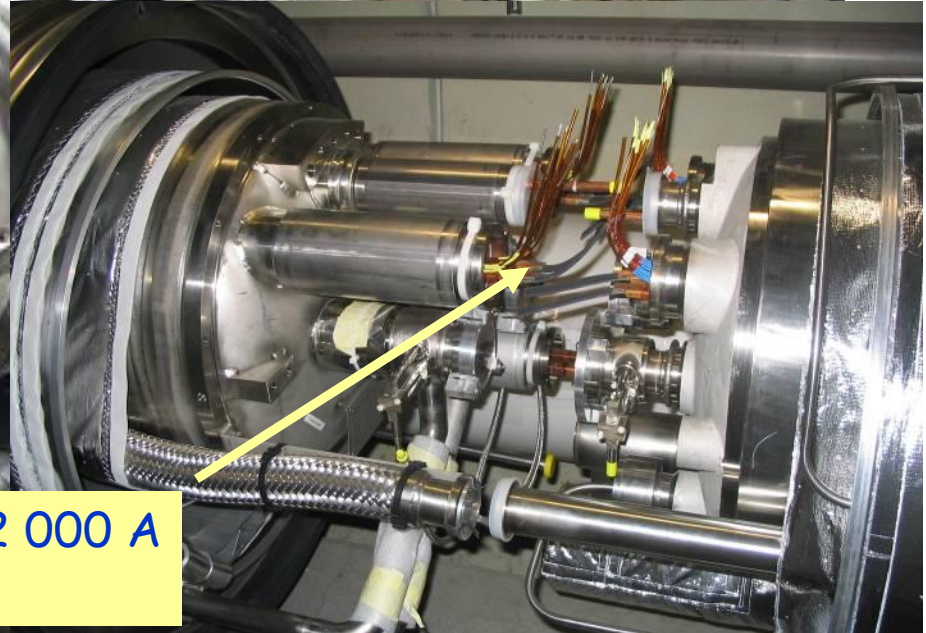
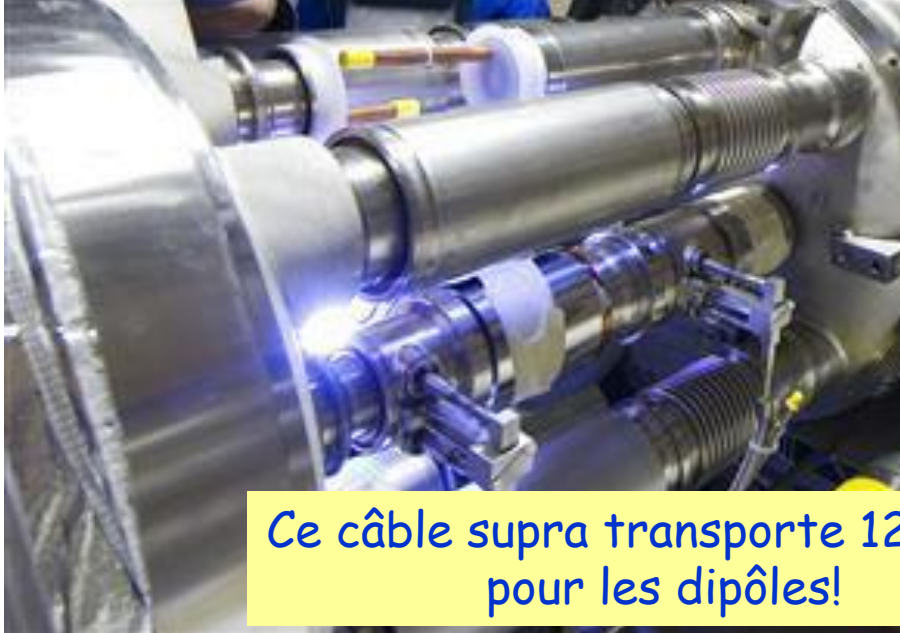
392 quadrupoles +
2500 Aimants correcteurs
(dipole, sextupole, octupole)

1232 dipoles +
3700 aimants
correcteurs
(sextupole,
octupole,
decapole)



Interconnexions

- 120 000 connexions
- 40 000 soudures
- Dans 1700 zones



Ce câble supra transporte 12 000 A pour les dipôles!



Le LHC

□ Un paramètre essentiel: la luminosité

$$L = \frac{kN^2 f}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} F = \frac{kN^2 f \gamma}{4\pi\beta^* \varepsilon} F \quad \sigma_x^* = \sigma_y^* = \sqrt{\frac{\beta^* \varepsilon}{\gamma}}$$

- $N =$ nombre de protons/paquet
- $k =$ nombre de paquets
- $f =$ fréquence de révolution (11.25 kHz)
- $\sigma_{x,y} =$ taille du faisceau au point d'interaction

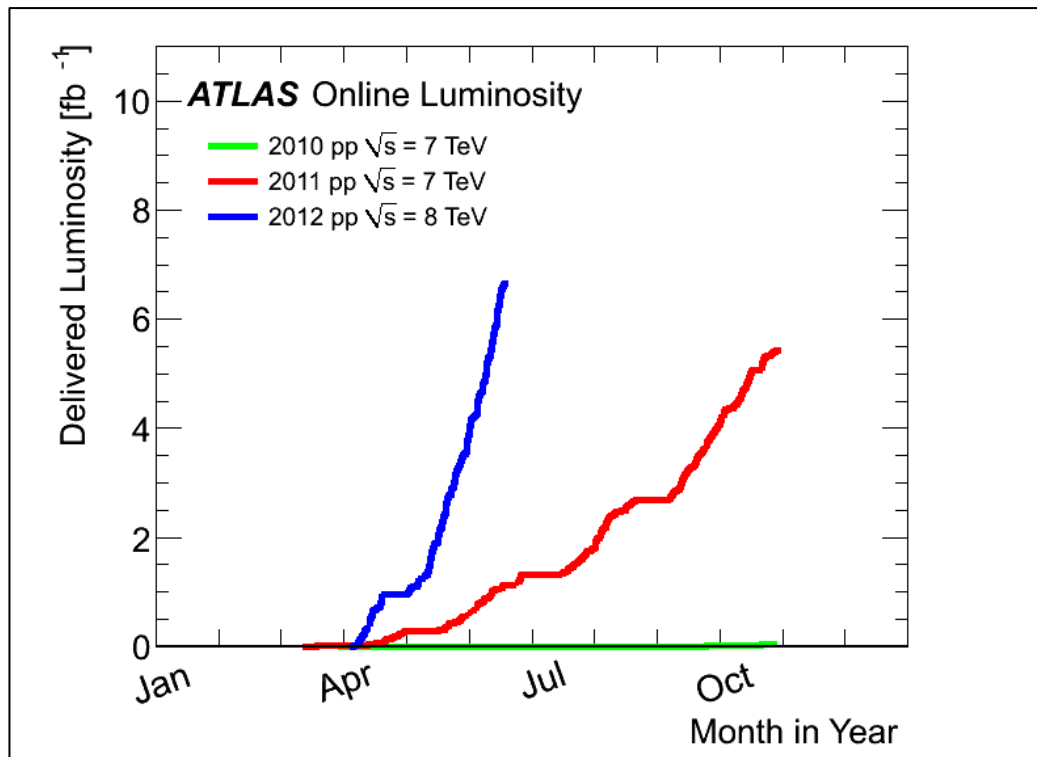
Paramètre	2010	2011	Nominal
$N (10^{11} \text{ p/bunch})$	1.2	1.35	1.15
k (nbre paquets)	368	1380	2808
Espacement paquets	150	50	25
ε ($\mu\text{m rad}$)	2.4-4	1.9-2.3	3.75
β^* (m)	3.5	1.5 \rightarrow 1	0.55
L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2×10^{32}	3.3×10^{33}	10^{34}

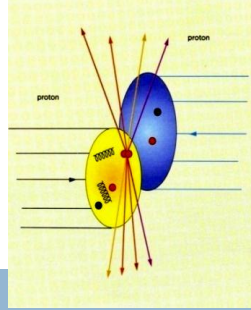


Le LHC

18

□ Augmentation de la luminosité



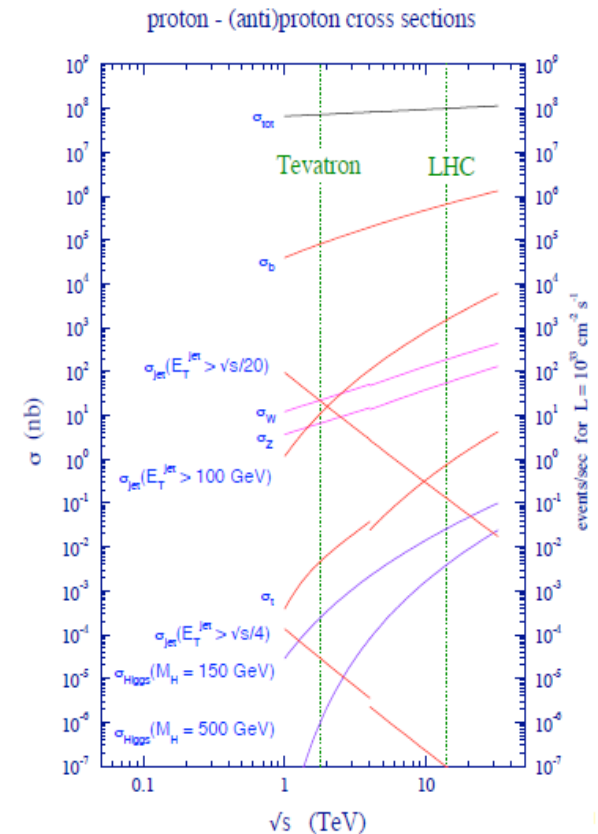


Section efficace proton-proton

- Dominée par les processus mous (« minimum bias »)
- $\sigma \sim 70 \text{ mb} @ 7 \text{ TeV}$

Processus « intéressant »: une aiguille dans une botte de foin

- Interaction « dure » entre constituants
 - grand transfert Q^2 ($>$ qques GeV^2)
=> exploration « haute énergie »
 - section efficace faible
 - calculs perturbatifs possibles et précis
- Événement sous-jacent dû aux quarks et gluons
« spectateurs »
 - Ressemble à un événement « minimum bias »
 - Difficile à calculer





Complexité d'une collision au LHC

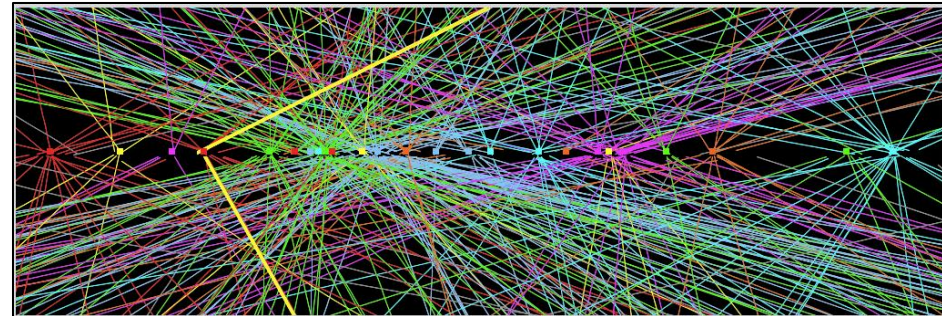
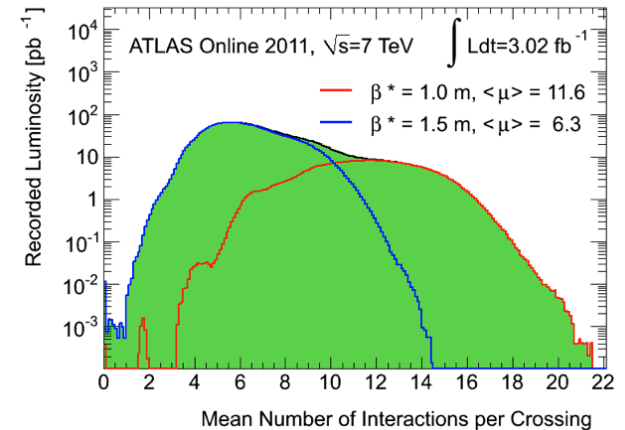
20

□ L'effet d'empilement

- ▣ A la luminosité actuelle, 12 interactions inélastiques en moyenne/collision
- Empilement d'événements se superposant à l'événement intéressant
- Exemple: événement $Z \rightarrow \mu\mu$ avec 24 vertex primaires

▣ Simulation pondérée % données

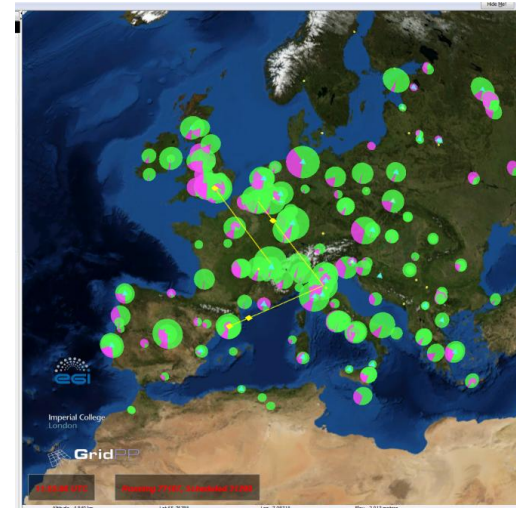
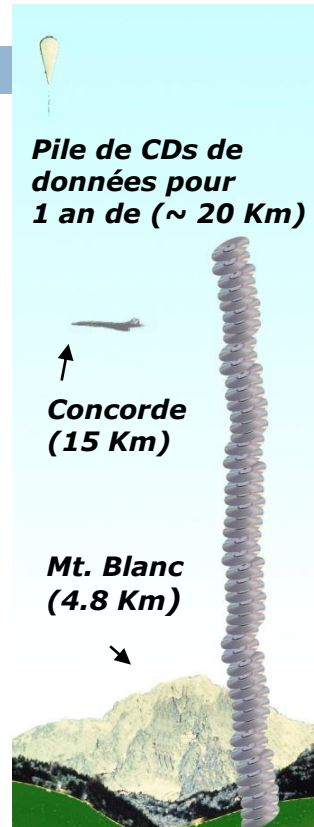
▣ Travail en cours sur les algorithmes de reconstruction



Des collisions aux résultats de physique

21

- **Traitement des données acquises par les détecteurs**
 - *Tri nécessaire:*
 - Événements banals nombreux, intéressants rares
 - Passer de 20 MHz à 100 Hz : 3 niveaux de trigger
 - *Traitement des données, analyse, simulation:*
 - Grille de calcul indispensable

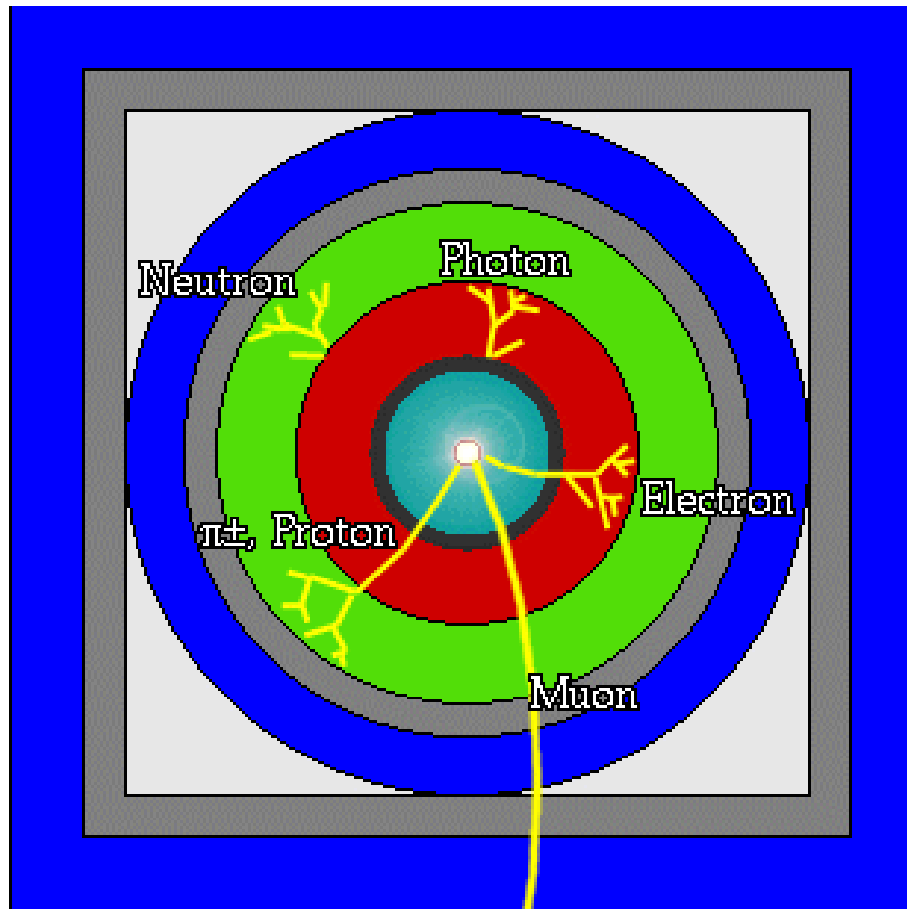




Détection des particules: principe

Schéma d'une expérience sur collisionneur (vue transverse à l'axe des faisceaux)

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Structure « en oignon »:

Chaque « couche » est spécialisée dans un type de mesure:

type de particule, énergie, impulsion...

Chaque « couche »: 10^4 à 10^8 détecteurs élémentaires



Design des détecteurs

- **Ingrédients nécessaires :**

Théoriciens

Ingénieurs

Prédiction

- mécanisme de production et de désintégration des particules recherchées
- nouvelles théories

- Construction
- accélérateurs
 - détecteurs
- Traitement données

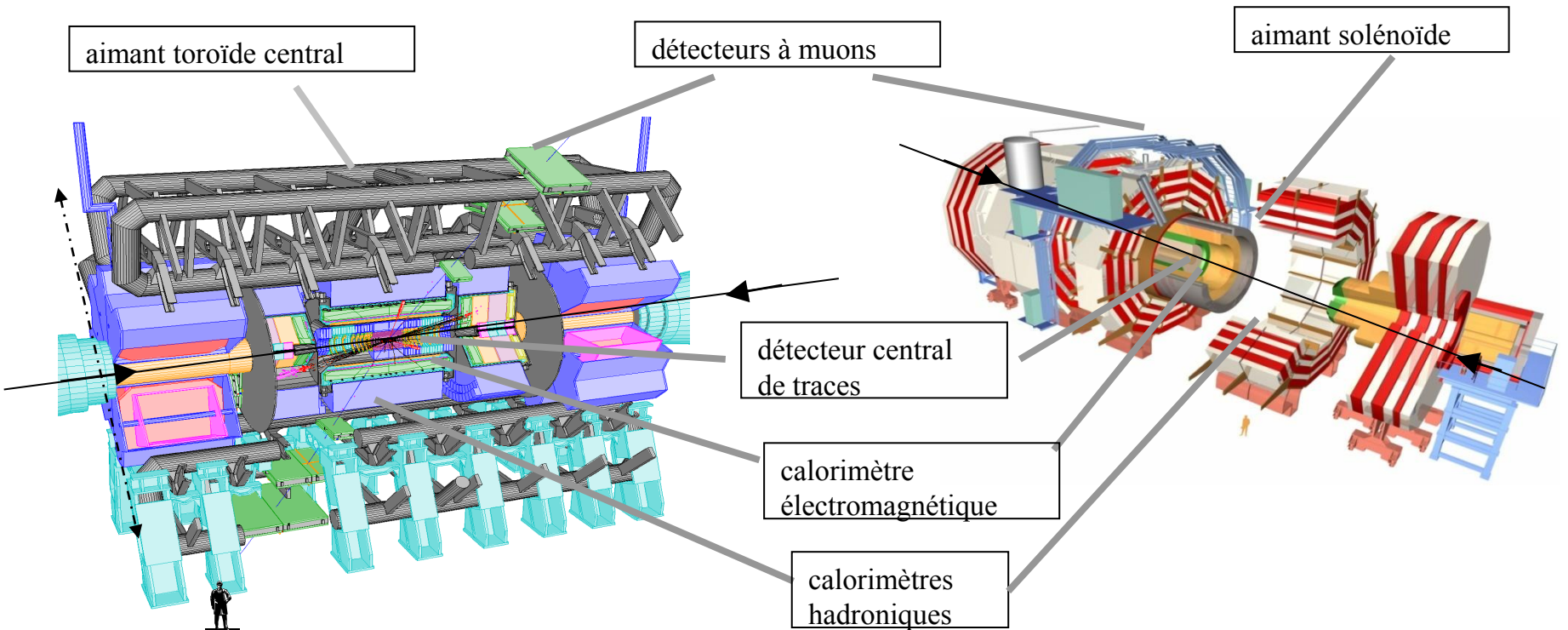
Chercheur
Des collaborations
ATLAS, CMS, Alice, LHCb

- Analyse des données
Identification des particules produites
- Interprétation
- Découverte ..ou non



Les détecteurs: ATLAS et CMS

Des détecteurs complémentaires: conception différente, finalité identique



ATLAS: le géant

44m de long, 22m de Ø, 7000t

Assemblé dans la caverne comme un légo géant

1800 physiciens & ingénieurs 167 instituts 37 pays

CMS: le poids lourd

21.5m de long, 15m de Ø, 12500t

Solénoïde supra le + gd et le + puissant (4T)

Assemblé en surface en 5 blocs hyper massifs

2000 physiciens & ingénieurs 183 instituts 39 pays



Le détecteur ATLAS

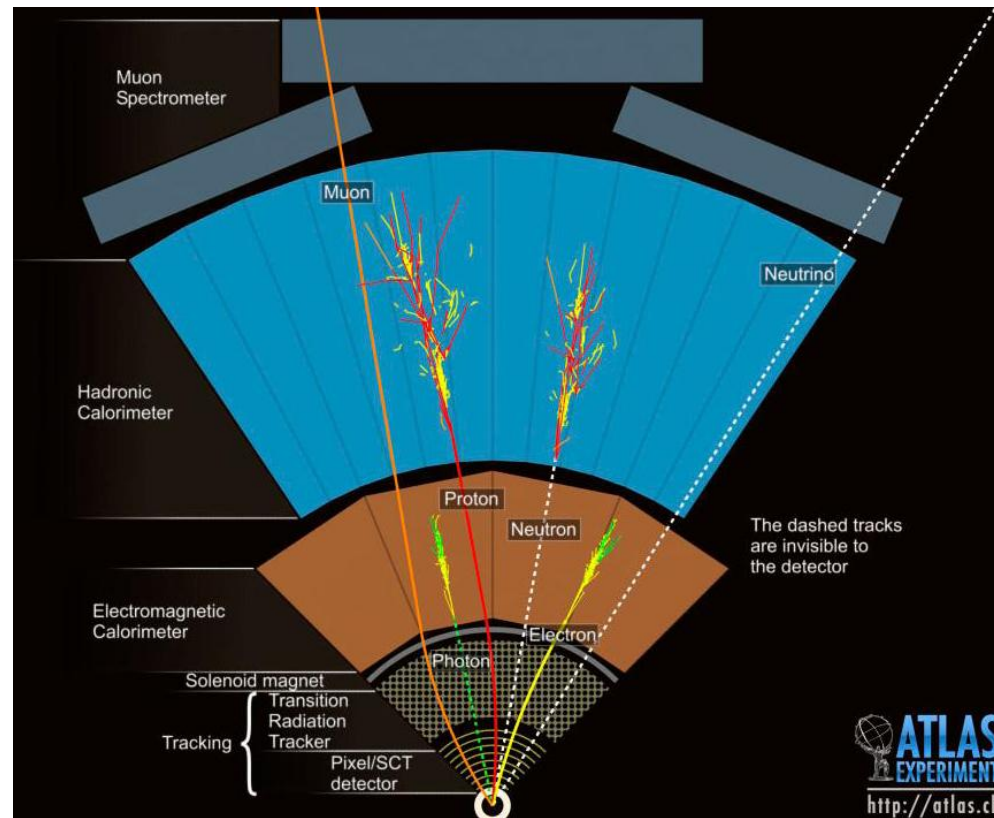
25

Pré-requis:

- Haute granularité
- Détecteurs rapides
- Résistants aux radiations
- Couverture 4π

Caractéristiques:

- Détecteur interne:
 - $\sigma/p_T = 0.038\% p_T \oplus 1.5\%$
- Calo EM
 - $\sigma/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$
- Calo hadronique:
 - $\sigma/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$
- Spectromètre à muons:
 - $\Delta p_T/p_T < 10\%$ jusqu'à 1 TeV

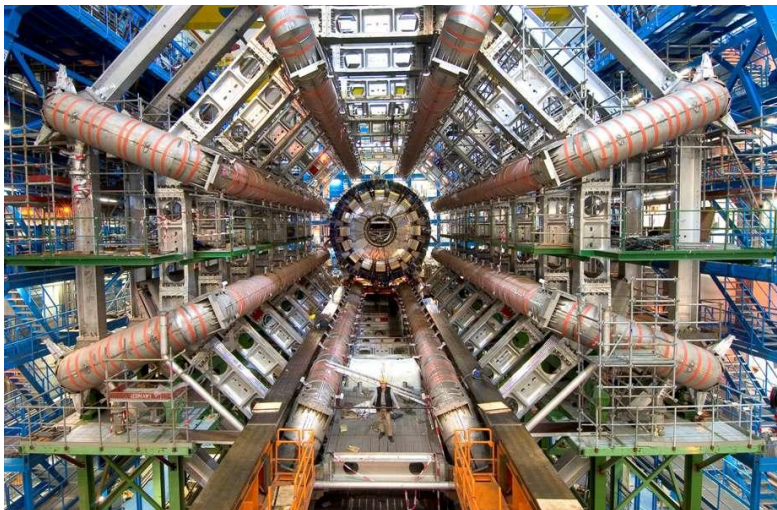




L'expérience ATLAS : quelques illustrations

• Les 8 aimants toroidaux supra.

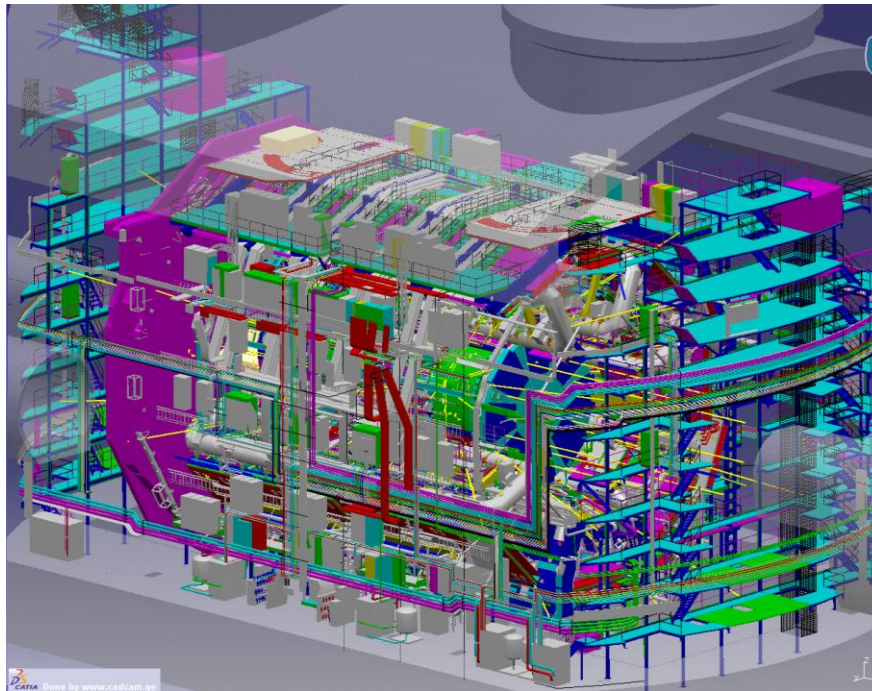
- ▣ *Champ magnétique de ≈ 0.5 Tesla*
 - **Courbe la trajectoire des muons**
- ▣ *Quelques chiffres:*
 - 20.1 m diamètre x 25.3 m long
 - ~ 12000 m³ volume
 - 830 tonnes
 - 1.05 GJ d'énergie stockée



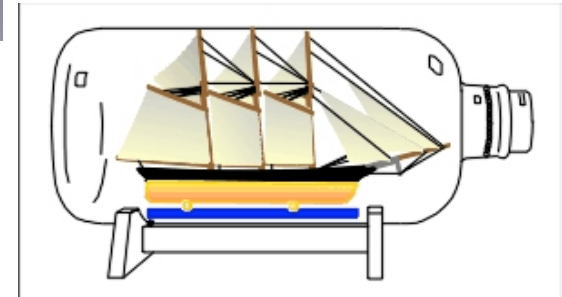


Le détecteur ATLAS

- **ATLAS est installée depuis 4 ans**

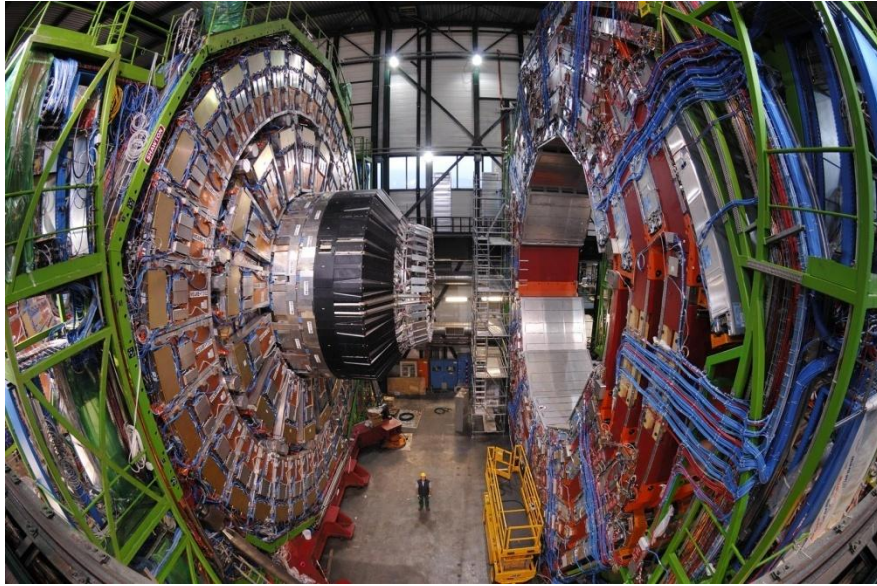


« Comme un navire dans une bouteille »



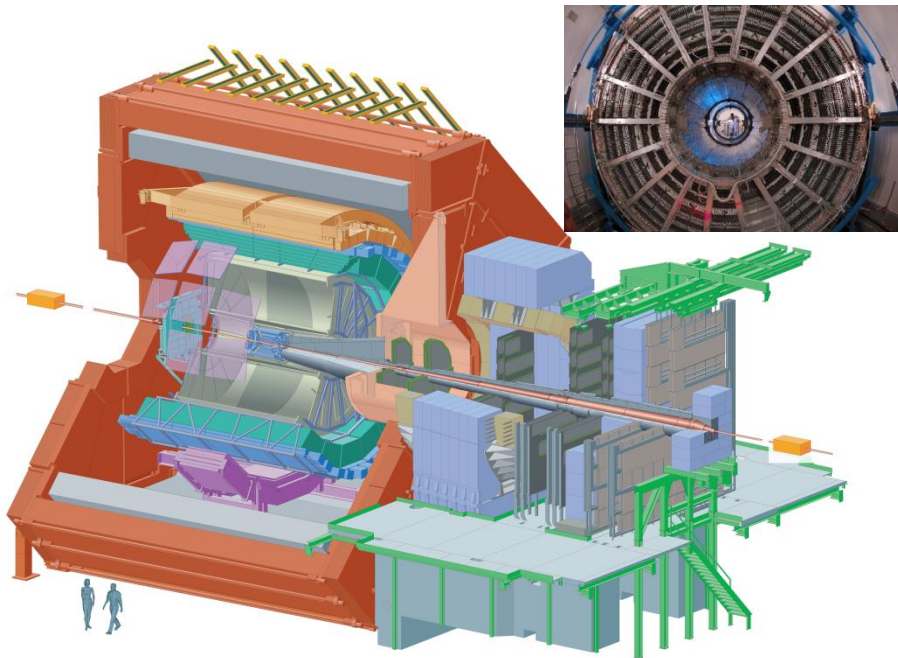


L'expérience CMS: quelques illustrations

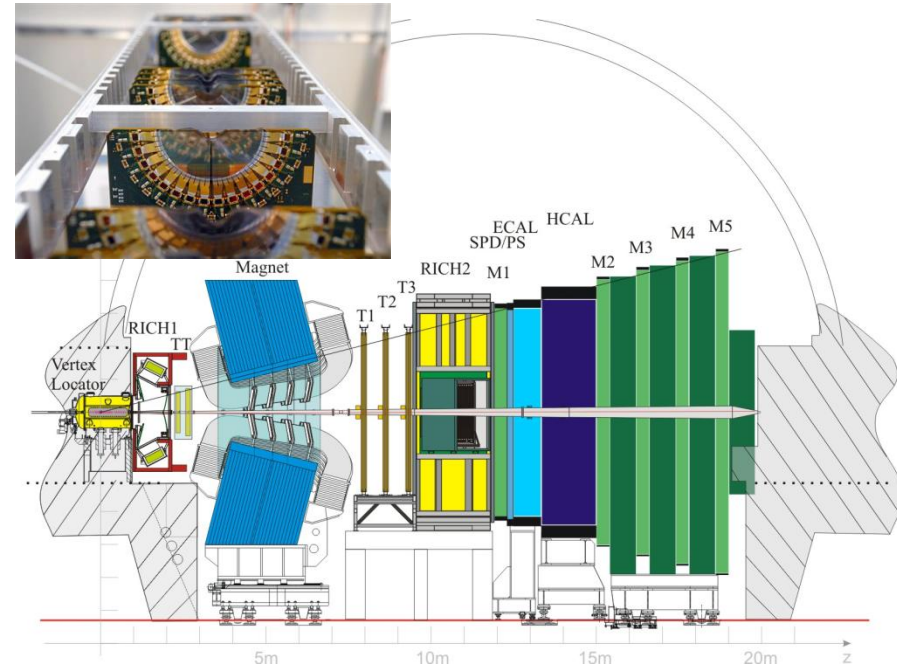




Alice et LHCb : les spécialistes



ALICE: soupe de quarks et de gluons
26m de long, 16m de large et de haut, 10000t
Collisions Pb-Pb: bcp de particules, mais pas très hte nrj
Taille informatique des événements colossale
1500 physiciens & ingénieurs 104 instituts 31 pays



LHCb: la physique du quark b
21m de long, 13m x 10m, 5600t
DéTECTEUR asymétrique, détection vers l'avant
Le VELO détecteur très précis de vertex pour
les désintégrations de B
650 physiciens & ingénieurs 47 instituts 14 pays