

# Le CERN et le LHC

## LHC Masterclasses

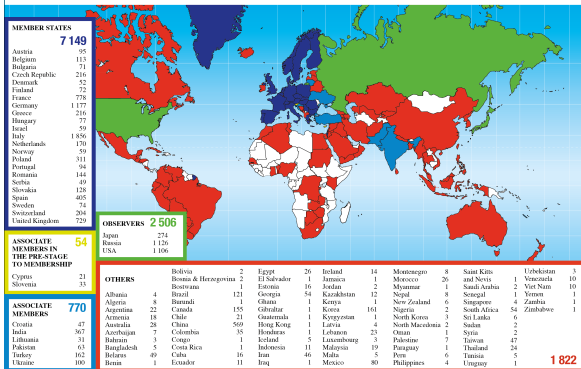
28 mars 2025

JF Marchand

## ● Organisation européenne pour la recherche nucléaire

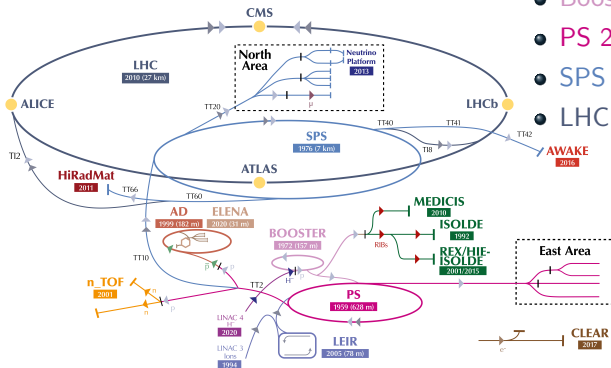
- Organisation internationale
- Créé en 1954
- 24 états membres
- ≈ 3000 employés
- ≈ 12000 utilisateurs
- ≈ 950 instituts
- Plus de 80 pays

Distribution of All CERN Users by Nationality on 27 January 2020





The CERN accelerator complex  
 Complexe des accélérateurs du CERN



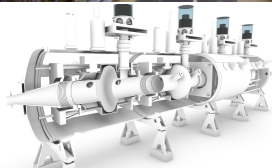
- Linac4 160 MeV (52% c)
- Booster 1.4 GeV (92% c)
- PS 25 GeV (99.93% c)
- SPS 450 GeV (99.9998% c)
- LHC 6.8 TeV (99.9999991% c)

▶  $H^-$  (hydrogen anions)  
 ▶ p (protons)  
 ▶ ions  
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)  
 ▶ n (neutrons)  
 ▶  $\bar{p}$  (antiprotons)  
 ▶  $e^-$  (electrons)  
 ▶  $\mu$  (muons)

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

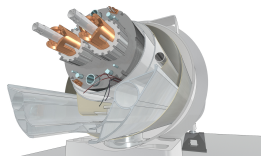
## Champs électriques

- 8 cavités RF par faisceau

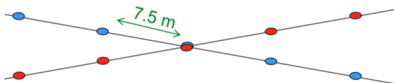


## Champs magnétiques:

- 1232 dipôles → courbure
- 392 quadrupôles → focalisation



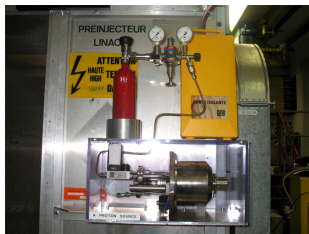
- Champs magnétique dans les dipôles: 8.3T ( $\approx 200\,000\times$  le champ magnétique terrestre)
- Technologie supraconductrice, He à  $-271.3^{\circ}\text{C}$  (1.9K): Plus froid que l'espace intersidéral (2.7K)
- Vide extrême dans l'enceinte des faisceaux: 10x plus poussé que sur la lune



- 2808 paquets de protons par faisceau
- 100 milliards de protons par paquet
- 11100 tours / seconde (en 10h un proton parcourt  $\approx 2$  distance Terre-Neptune)
- Epaisseur d'un paquet:  $\approx 1\text{mm} \rightarrow 20\mu\text{m}$  aux points de collision (1/2 cheveu)
- Energie de chaque faisceau: 6.8 TeV
  - 1TeV = 1 Tera électron-Volt =  $10^{12}$  eV (énergie d'un moustique en vol)
  - Energie du faisceau :  $\approx$  TGV à 150 km/h

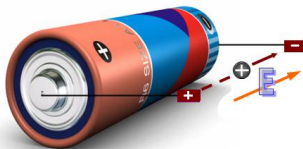
## • D'où viennent les protons?

- 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
- $1\text{cm}^3$  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  $\approx 100$  ans
- Une bouteille contient environ 5kg de gaz, soit 2500 moles, soit  $3 \times 10^{27}$  atomes d'hydrogène  $\rightarrow 4 \cdot 10^9$  années !!

- 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

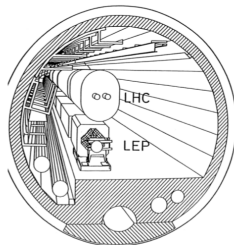
$$1 \text{ eV}/c^2 = \frac{1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}}{(299\,792\,458 \text{ m/s})^2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ J} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

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

$$\begin{cases} m_{\text{electron}} = 0.5110 \text{ MeV} \\ m_{\text{proton}} = 0.9383 \text{ GeV} \\ m_{\text{neutron}} = 0.9396 \text{ GeV} \end{cases}$$

- **Mars 1984**: 1<sup>ère</sup> 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<sup>er</sup> dipôle dans le tunnel

ECFA 84/1  
CERN 84-10  
5 September 1984



LARGE HADRON COLLIDER  
IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

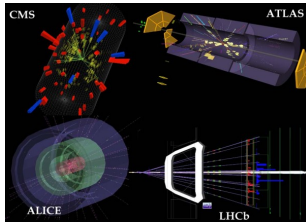
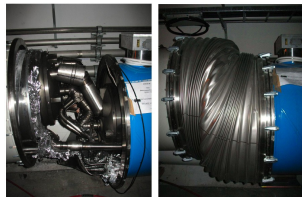
held at Lausanne and Geneva,  
21-27 March 1984

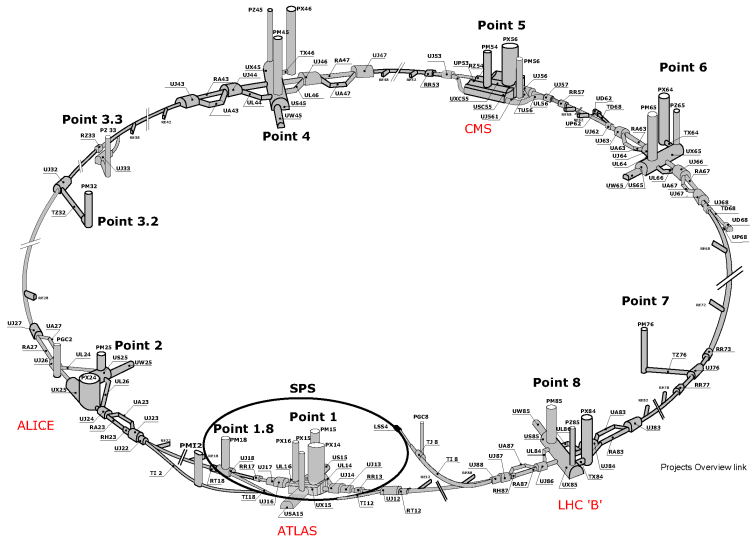


- **10 septembre 2008:** Circulation du 1<sup>er</sup> faisceau



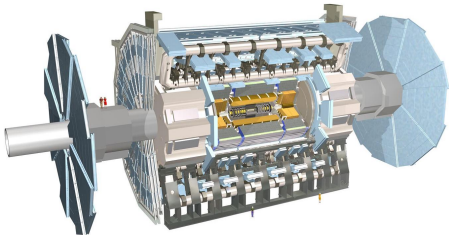
- **19 septembre 2008:** Défaillance d'une connexion électrique entre un dipôle et un quadripôle
- **23 octobre 2009:** Redémarrage !!
- **23 novembre 2009:** 1<sup>ères</sup> collisions à 900 GeV
- **30 mars 2010:** Collisions à 7 TeV
- **5 avril 2012:** Collisions à 8 TeV
- **20 mai 2015:** 1<sup>ères</sup> collisions à 13 TeV
- **5 juillet 2022:** 1<sup>ères</sup> collisions à 13.6 TeV



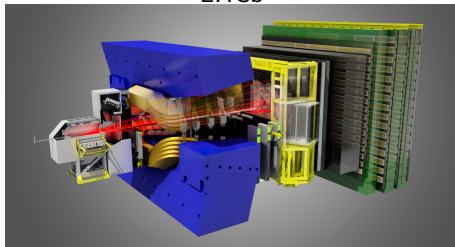




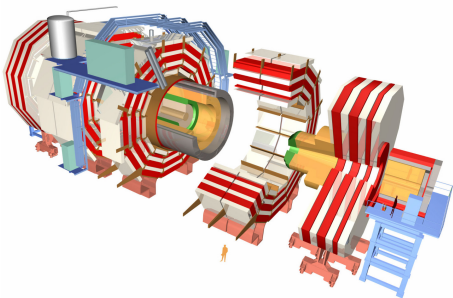
ATLAS



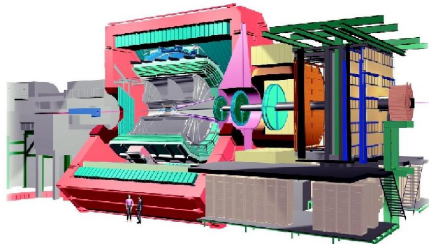
LHCb

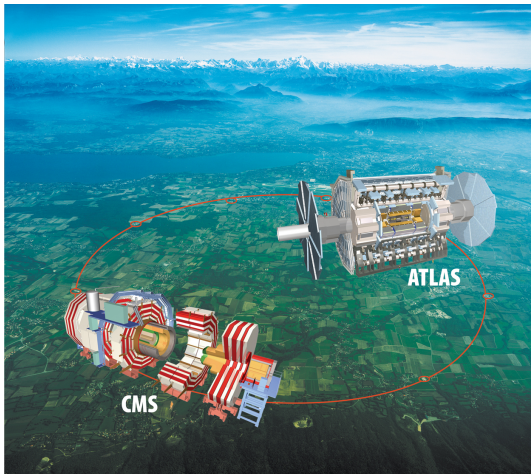


CMS



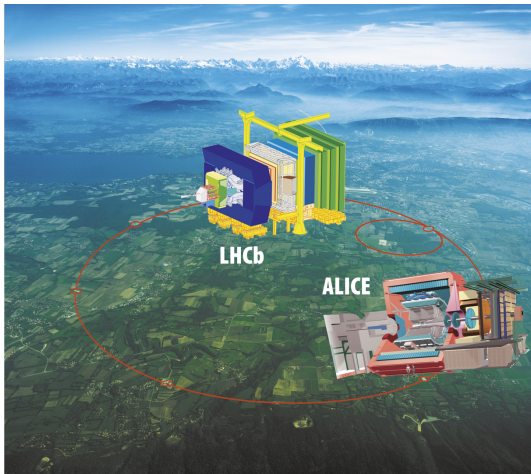
ALICE



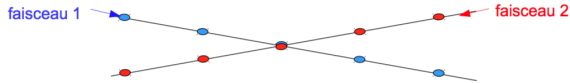


- 2 expériences "généralistes"
  - **ATLAS**: 46×22 m, 7000 t
  - **CMS**: 21×15! m, 14 000 t  
( $\approx 3000$  physiciens chacune)

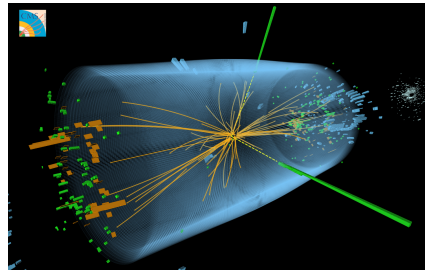
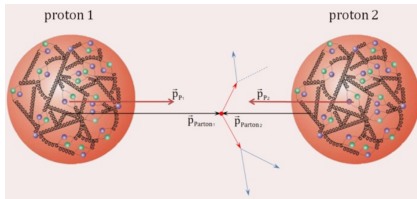
Buts: recherche du boson de Higgs, découverte de nouvelles particules



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

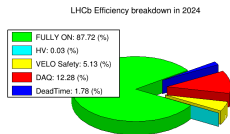
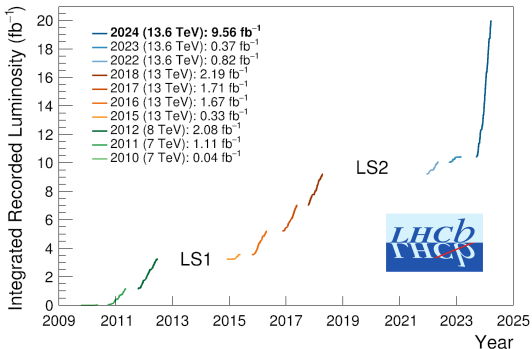


- 40 millions de croisement par seconde
- Plusieurs collisions de protons par croisement
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision  $\Rightarrow$  Mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour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



- Le LHC fonctionne 24h/24, 7j/7 pour accumuler le maximum de statistique
- Arrêt en hiver (consommation du CERN  $\approx$  1/2 de celle du canton de Genève...)
- Les physiciens se relayent ( $3 \times 8$  h) dans les salles de contrôle pour assurer le bon fonctionnement des détecteurs





- Le nombre d'interactions  $pp$  est donné par la relation 
$$N = \sigma_{\text{tot}} \cdot \mathcal{L}$$
 où  $\begin{cases} \sigma_{\text{tot}} \text{ est la section efficace totale d'interaction } pp \\ \mathcal{L} \text{ est la luminosité} \end{cases}$
- Au LHC,  $\sigma_{\text{tot}} \approx 100 \text{ mb}$   $\Rightarrow N_{2018} \approx 100 \cdot 10^{12} \text{ fb} \times 2.2 \text{ fb}^{-1} = 2.2 \cdot 10^{14}$   
 Soit environ 220 000 milliards d'interactions  $pp$  en 2018  
 Et environ **956 000 milliards d'interactions  $pp$  en 2024 !!**

