

Le CERN et le LHC

LHC Masterclasses

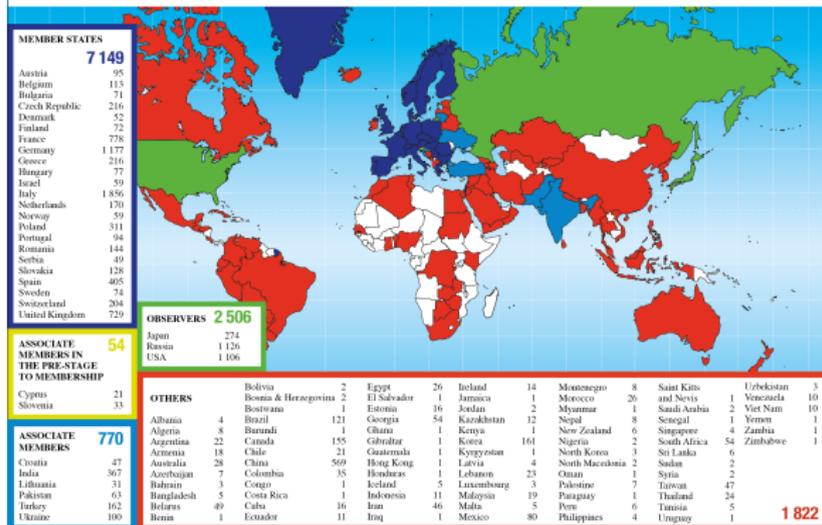
15 mars 2024

JF Marchand

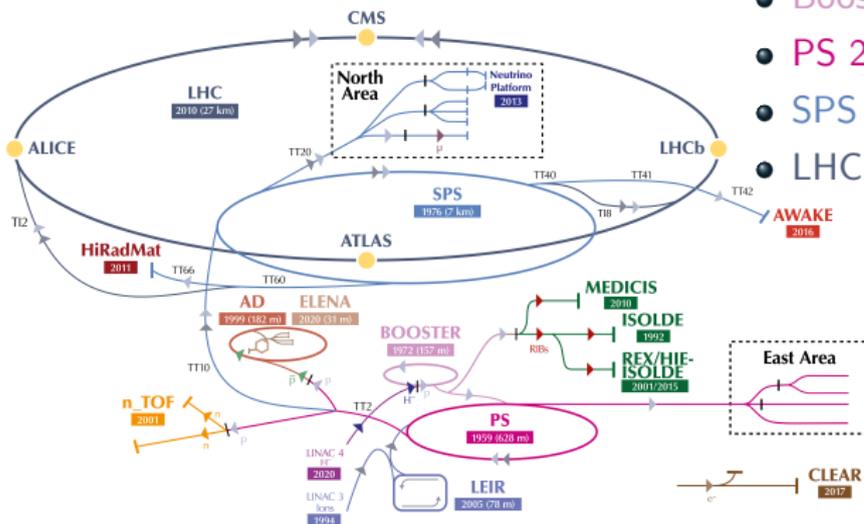
● Organisation européenne pour la recherche nucléaire

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

Distribution of All CERN Users by Nationality on 27 January 2020



The CERN accelerator complex
 Complexe des accélérateurs du CERN



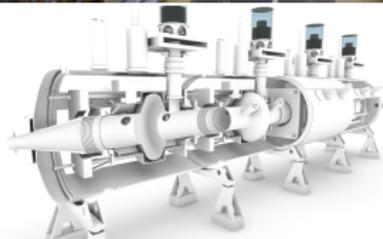
- Linac4 160 MeV (52% c)
- Booster 1.4 GeV (92% c)
- PS 25 GeV (99.93% c)
- SPS 450 GeV (99.9998% c)
- LHC 6.8 TeV (99.9999991% c)

▶ H⁻ (hydrogen anions)
 ▶ p (protons)
 ▶ ions
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
 ▶ n (neutrons)
 ▶ \bar{p} (antiprotons)
 ▶ e⁻ (electrons)
 ▶ μ (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

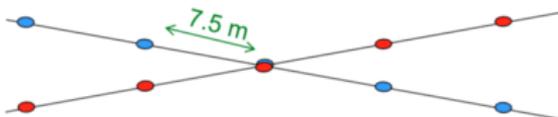


Champs magnétiques:

- 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°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 ≈ 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

- 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

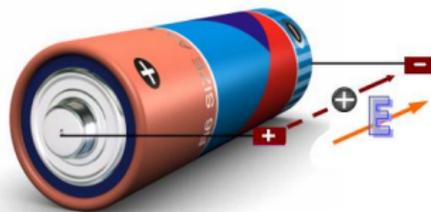
⇒ Environ $5 \cdot 10^{19}$ atomes d'hydrogène !!!

⇒ $\approx 100\ 000$ 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 !!

- 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

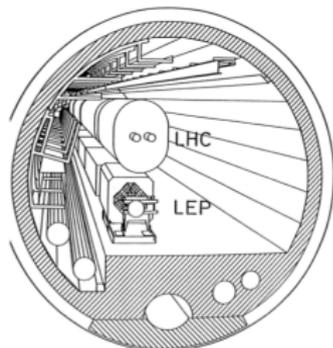
$$1 \text{ eV}/c^2 = \frac{1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}}{(299\,792\,458 \text{ m/s})^2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ J} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1.783 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

- 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^{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 84/1
CERN 84-10
5 September 1984



LARGE HADRON COLLIDER
IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

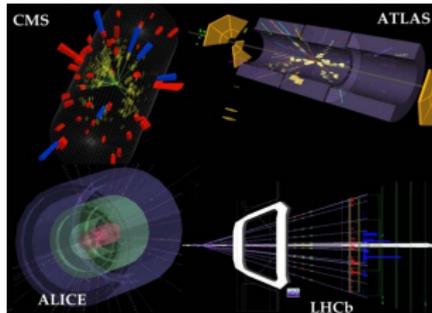
held at Lausanne and Geneva,
21-27 March 1984

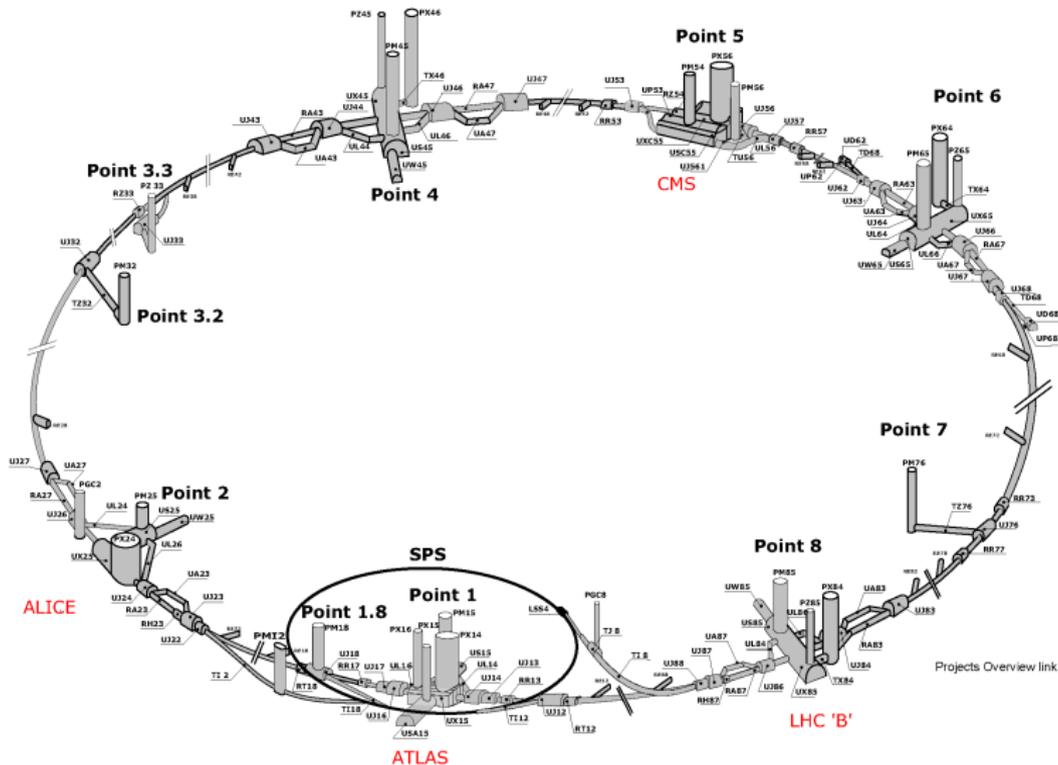


- **10 septembre 2008:** Circulation du 1^{er} faisceau

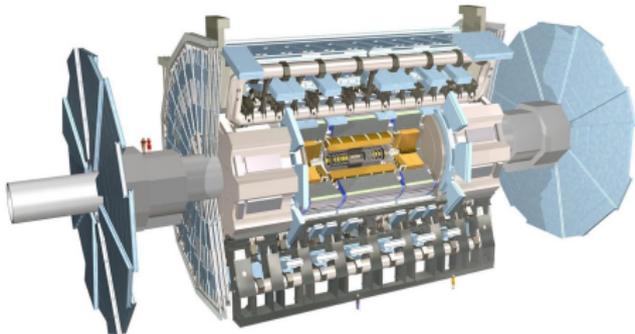


- **19 septembre 2008:** Défaillance d'une connexion électrique entre un dipôle et un quadripôle
- **23 octobre 2009:** Redémarrage !!
- **23 novembre 2009:** 1^{ères} collisions à 900 GeV
- **30 mars 2010:** Collisions à 7 TeV
- **5 avril 2012:** Collisions à 8 TeV
- **20 mai 2015:** 1^{ères} collisions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

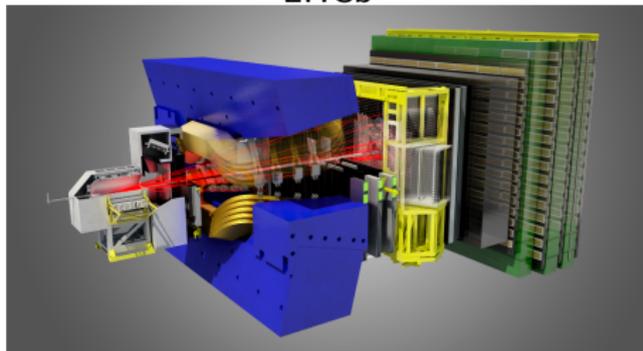




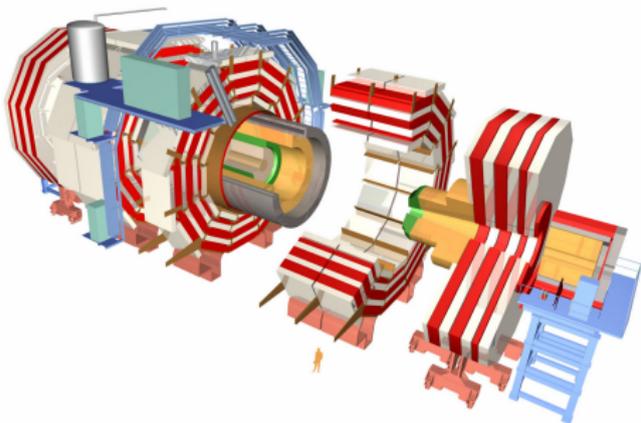
ATLAS



LHCb

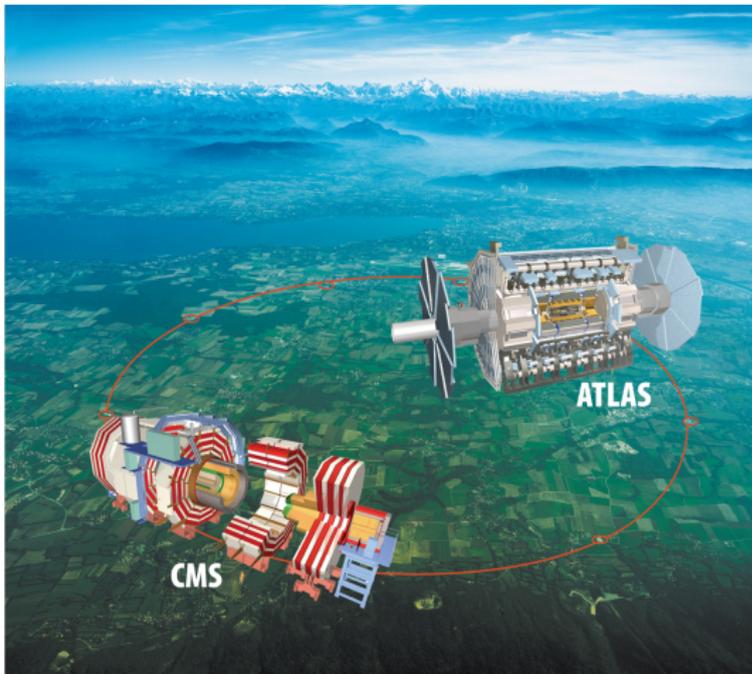


CMS



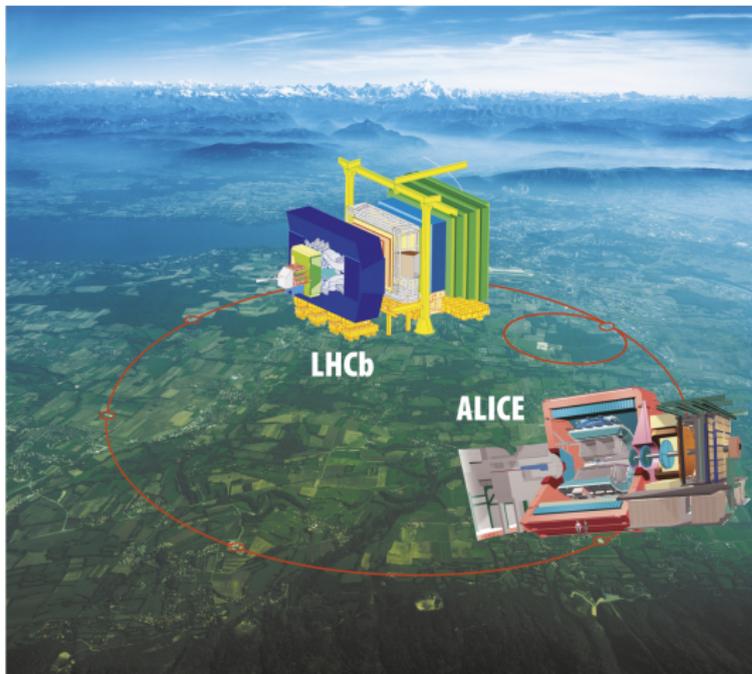
ALICE



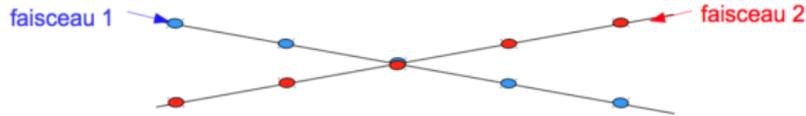


- 2 expériences "généralistes"
 - **ATLAS**: 46×22 m, 7000 t
 - **CMS**: 21×15! m, 14 000 t
(≈3000 physiciens chacune)

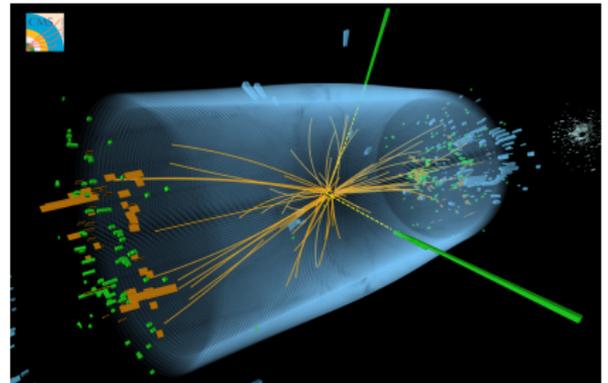
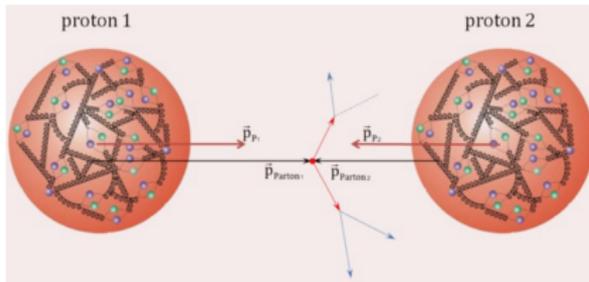
Buts: recherche du boson de Higgs, découverte de nouvelles particules



- **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)



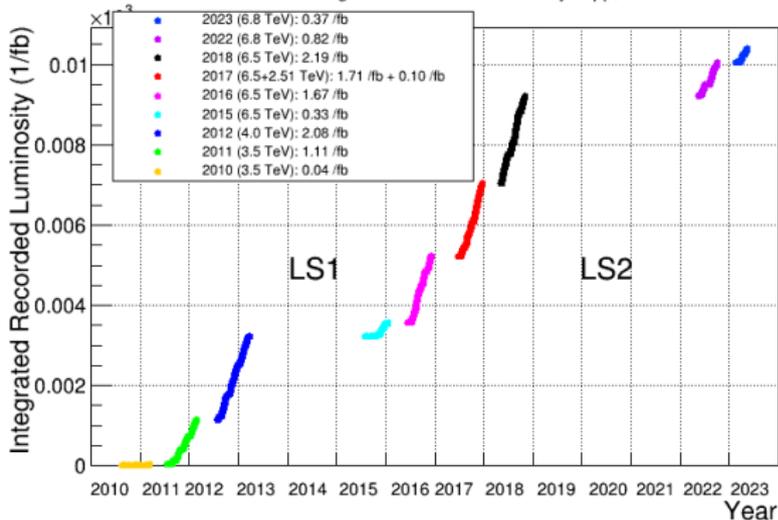
- 40 millions de croisement par seconde
- Plusieurs collisions de protons par croisement
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision \Rightarrow Mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du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



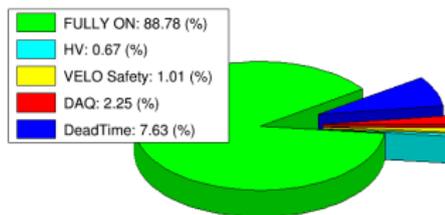
- Le LHC fonctionne 24h/24, 7j/7 pour accumuler le maximum de statistique
- Arrêt en hiver (consommation du CERN \approx 1/2 de celle du canton de Genève...)
- Les physiciens se relayent (3×8 h) dans les salles de contrôle pour assurer le bon fonctionnement des détecteurs



LHCb Cumulative Integrated Recorded Luminosity in pp, 2010-2023



LHCb Efficiency breakdown in 2018



- 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 !!**

