

Le LHC au
CERN :
produire des
particules pour
les étudier



Le MODÈLE standard de la physique des particules

$$L = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu} G^{\mu\nu}$$

$$+i \sum_{\text{fermions}} \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi$$

$$+ \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\text{leptons}} \bar{\psi}_\nu \gamma^\mu \frac{(1-\gamma^5)}{2} \psi_l W_\mu^+ + \text{h.c.}$$

$$+ \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\text{quarks}} \bar{\psi}_{q_u} \gamma^\mu \frac{(1-\gamma^5)}{2} V_{q_u q_d} \psi_{q_d} W_\mu^+ + \text{h.c.}$$

$$+ g \sin \theta_W \sum_{\text{fermions}} Q_f \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu$$

$$+ \frac{g}{\cos \theta_W} \sum_{\text{fermions}} \bar{\psi} \gamma^\mu \frac{(g_v - g_a \gamma^5)}{2} \psi Z_\mu$$

$$+ \frac{1}{2} \partial_\mu \eta \partial^\mu \eta + \mu^2 \eta^2 - \frac{\mu^2 v^2}{4}$$

$$+ \frac{g^2 v^2}{4} W^{+\mu} W_\mu^- + \frac{(g^2 + g'^2) v^2}{8} Z^\mu Z_\mu$$

$$+ \lambda v \eta^3 + \frac{\lambda}{4} \eta^4$$

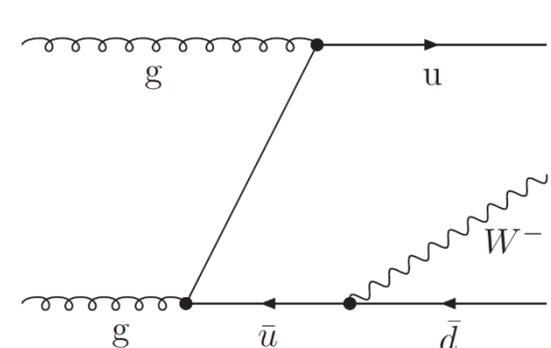
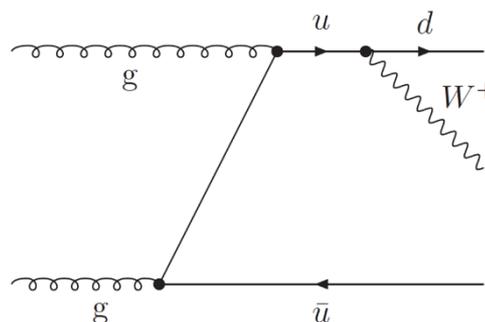
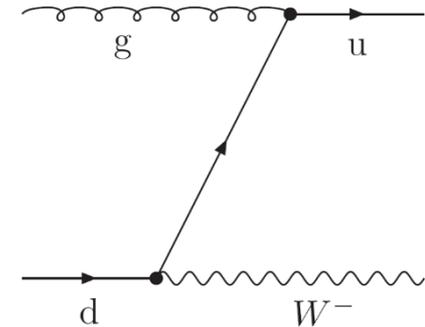
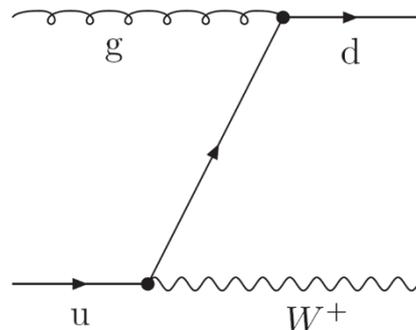
$$+ \frac{g^2}{4} (2v\eta + \eta^2) W^{+\mu} W_\mu^-$$

$$+ \frac{g^2}{8 \cos^2 \theta_W} (2v\eta + \eta^2) Z^\mu Z_\mu$$

$$+ \sum_{\text{fermions}} m_f \bar{\psi} \psi$$

$$+ \sum_{\text{fermions}} \frac{m_f}{v} \eta \bar{\psi} \psi$$

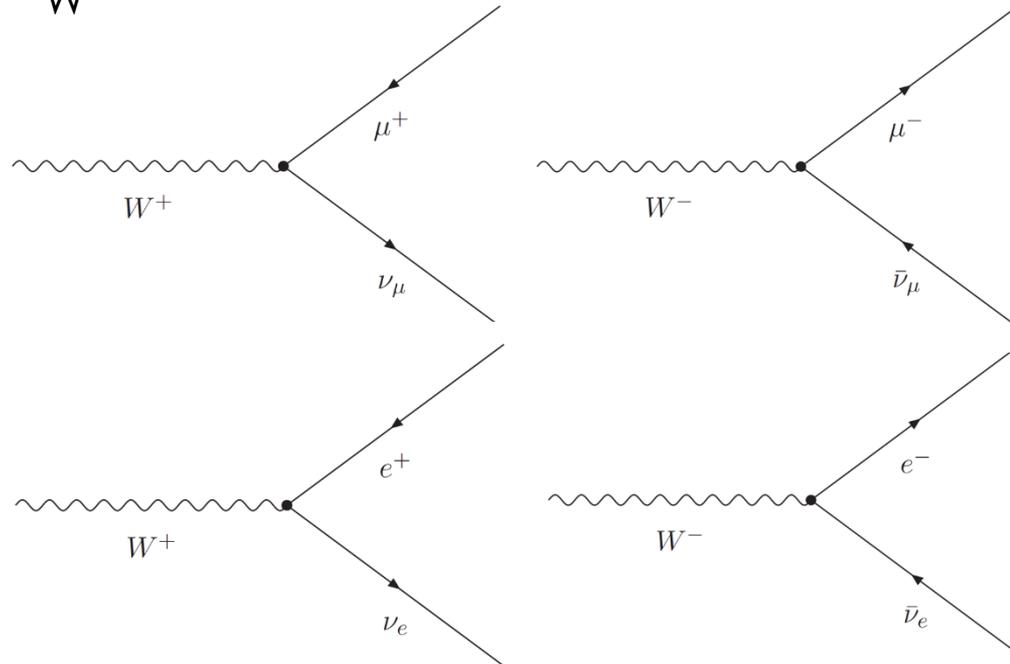
- Modèle = équation mathématique \Rightarrow calculs + confrontation avec les mesures expérimentales = test de notre compréhension
- Par exemple, la production de bosons W^+ et W^-



Le MODÈLE standard de la physique des particules

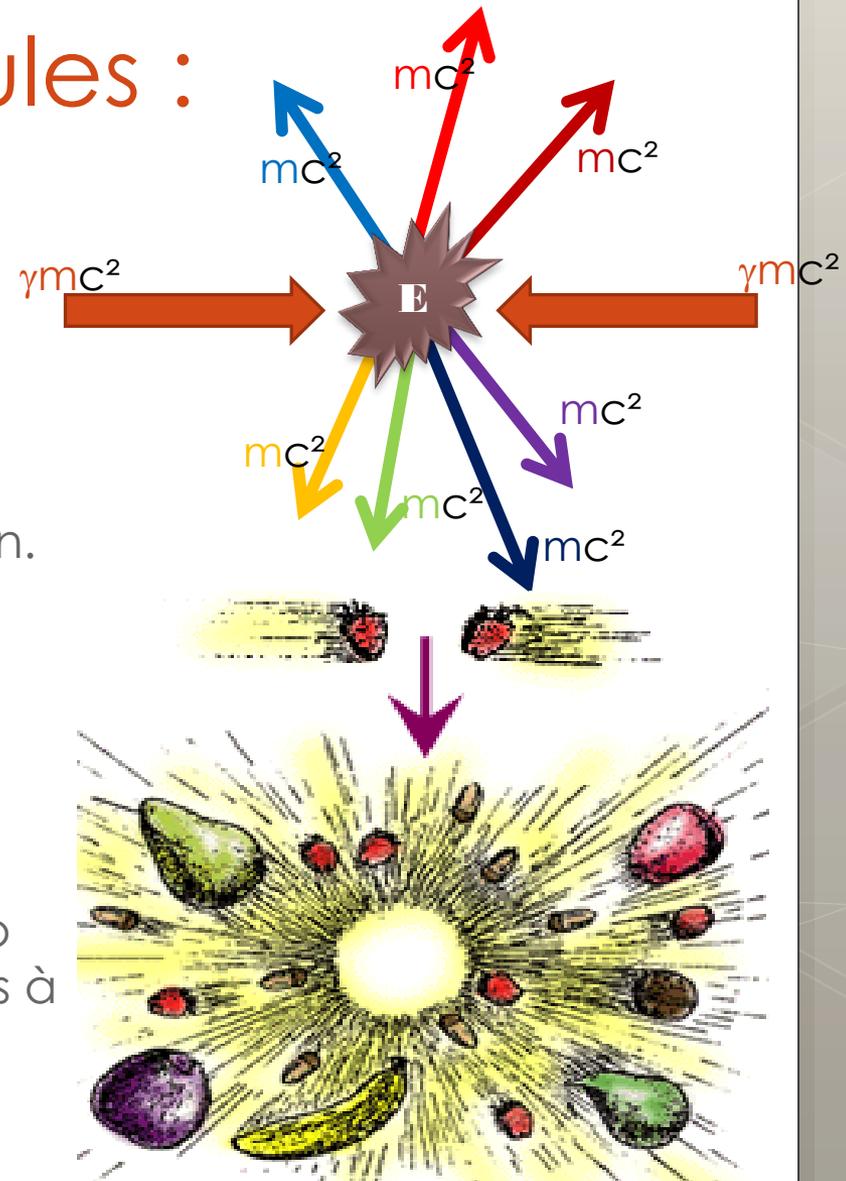
$$\begin{aligned}
 L = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^i F_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} \\
 & + i \sum_{\text{fermions}} \bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\text{leptons}} \bar{\psi}_\nu \gamma^\mu \frac{(1-\gamma^5)}{2} \psi_l W_\mu^+ + \text{h.c.} \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\text{quarks}} \bar{\psi}_{q_u} \gamma^\mu \frac{(1-\gamma^5)}{2} V_{q_u q_d} \psi_{q_d} W_\mu^+ + \text{h.c.} \\
 & + g \sin \theta_W \sum_{\text{fermions}} Q_f \bar{\psi} \gamma^\mu \psi A_\mu \\
 & + \frac{g}{\cos \theta_W} \sum_{\text{fermions}} \bar{\psi} \gamma^\mu \frac{(g_v - g_a \gamma^5)}{2} \psi Z_\mu \\
 & + \frac{1}{2} \partial_\mu \eta \partial^\mu \eta + \mu^2 \eta^2 - \frac{\mu^2 v^2}{4} \\
 & + \frac{g^2 v^2}{4} W^{+\mu} W_\mu^- + \frac{(g^2 + g'^2) v^2}{8} Z^\mu Z_\mu \\
 & + \lambda v \eta^3 + \frac{\lambda}{4} \eta^4 \\
 & + \frac{g^2}{4} (2v\eta + \eta^2) W^{+\mu} W_\mu^- \\
 & + \frac{g^2}{8 \cos^2 \theta_W} (2v\eta + \eta^2) Z^\mu Z_\mu \\
 & + \sum_{\text{fermions}} m_f \bar{\psi} \psi \\
 & + \sum_{\text{fermions}} \frac{m_f}{v} \eta \bar{\psi} \psi
 \end{aligned}$$

- Attention, la plupart des particules sont **instables** :
 - Les **produire** pour les étudier
 - Les étudier via leurs produits de désintégration
- Par exemple, la désintégration de bosons W^+ et W^-



L'outil pour produire des particules : l'accélérateur

- $E=mc^2$: particules \Leftrightarrow énergie.
-  Energies de masse et cinétique \Rightarrow accélération.
- On accélère des particules faciles à produire ou à récupérer (ex. proton i.e. noyau d'hydrogène)
- On les fait se collisionner : beaucoup d'énergie = beaucoup de particules à observer! Collisions de particules \Leftrightarrow d'autres particules.

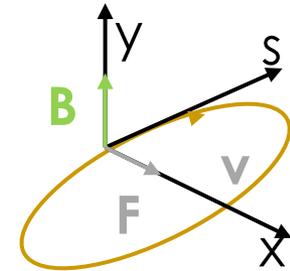


Comment accélère-t-on des particules?

- Particules chargées de charge q
- Avec des champs électrique et magnétique
- 2 composantes du champ :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

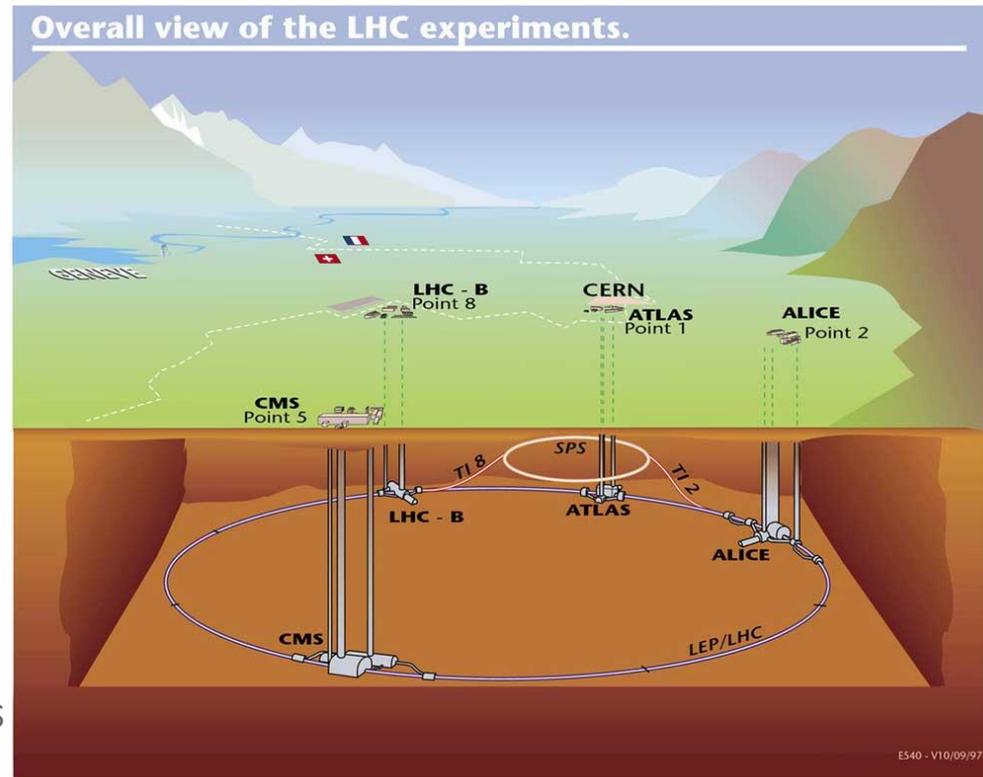
électrique : énergie	magnétique : courbure
cavités accélératrices	aimants dipolaires



- Collisionneur ou cible fixe
- Circulaire ou linéaire
- Choix des particules à accélérer
- Gros projets ultra-technologiques, uniques, coûteux en temps, argent, personnes donc cahier des charges bien défini qui influence les choix technologiques

LHC

- Buts fixés dès 1984 :
 - recherche du boson de Higgs
 - Au-delà du MS
 - Mesures de précision et tests
 - Interaction forte
- Par exemple pour le boson de Higgs :
 - **Haute énergie** pour sonder de hautes masses (limites posées par les accélérateurs précédents)
 - **Haute luminosité** : par exemple on attend la production de 1 boson de Higgs pour dix milliards de collisions!!!!



Large (27km de circ.) **Hadron** (protons) **Collider** (collisionneur)

Le CERN

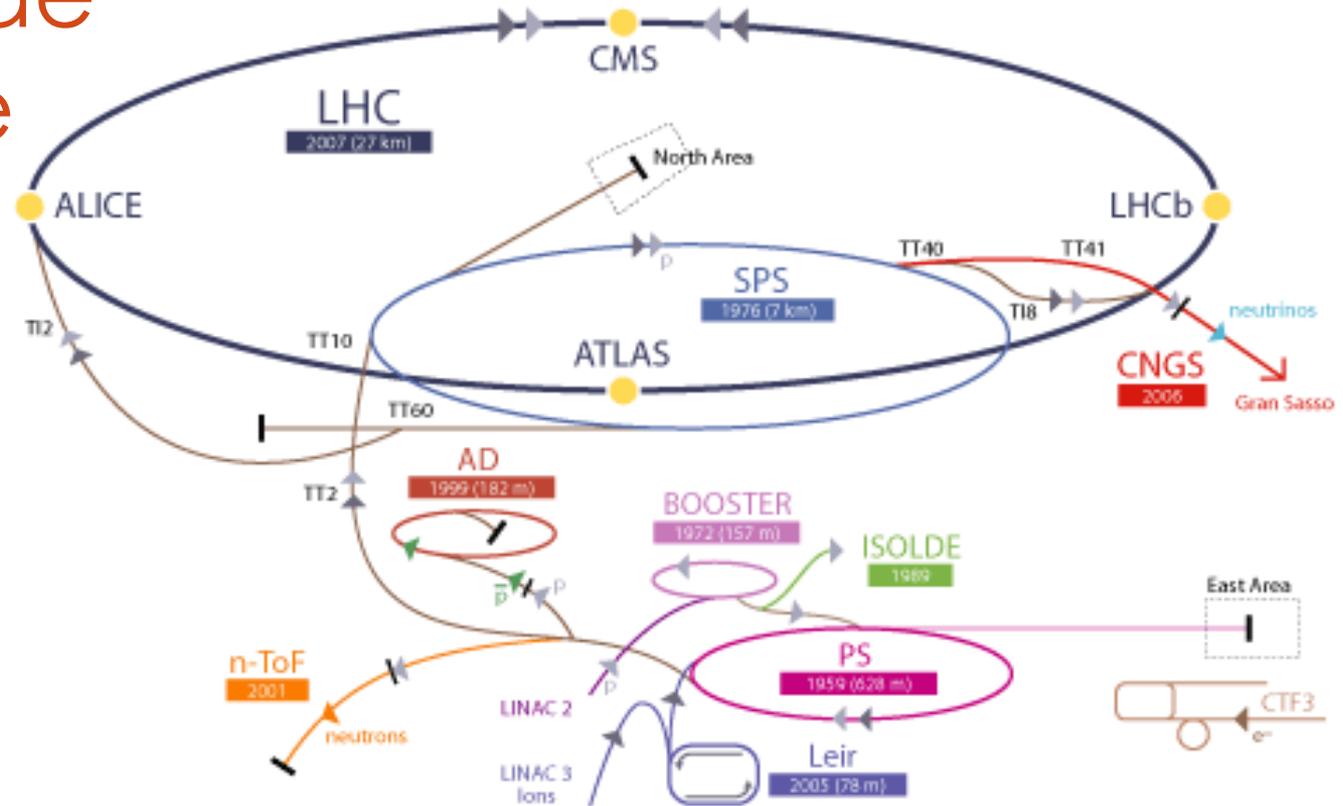
- Lieux spéciaux pour « faire » cette physique : de grands laboratoires qui regroupent les chercheurs, physiciens et techniciens que vous allez rencontrer aujourd'hui.
- Certains de ces laboratoires sont des « facilities », qui facilitent la vie des chercheurs en fournissant :
 - Un lieu propice à la recherche, aux échanges constructifs, aux trouvailles
 - Les outils pour créer les particules, les accélérateurs, et détecter les particules, les détecteurs, que vous présentera Laurent
 - Le temps et les moyens de préparer le futur pendant qu'on exploite le présent, toute la logistique et le soutien : experts, R&D, informatique, communication (web)... bureaux, cantines, hôtels, salles de réunion, bibliothèque...



- Le **CERN** (**C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire) est un des plus grands et plus géniaux lieux de ce type.

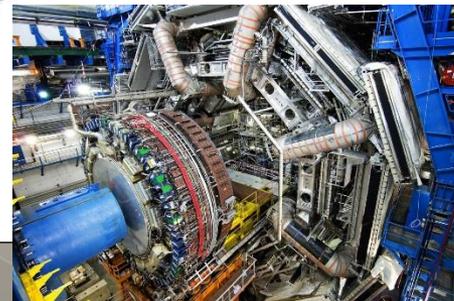
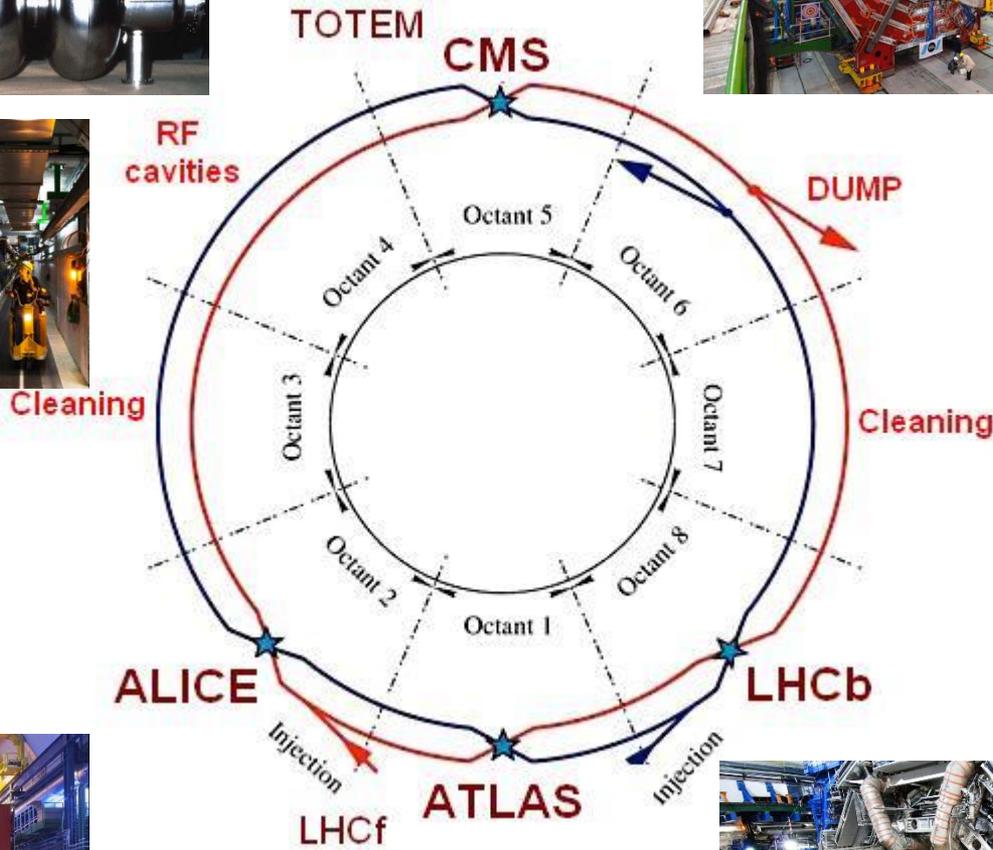
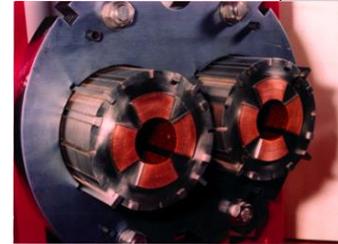
Le dernier étage de la fusée

Le complexe d'accélérateurs du CERN



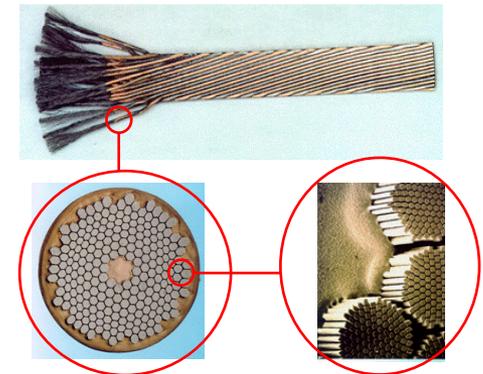
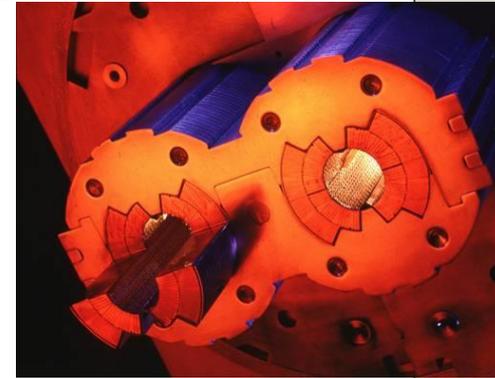
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

Structure du LHC



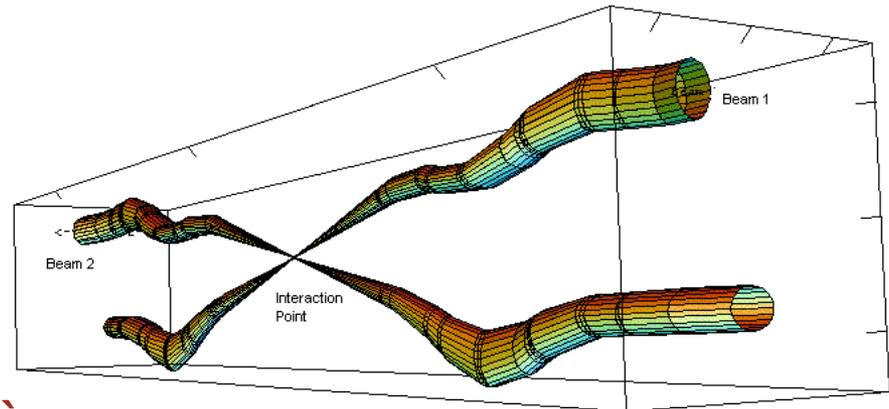
Une machine exceptionnelle : aimants & cryogénie

- La circonférence du LHC est de 26 659 m et la machine contient 9300 aimants dont 1232 **dipôles**, le plus gros défi à relever (14.3m et 35t par dipôle = 18 km de dipôles sur les 27 km de LHC)
- Caractéristiques
 - Supraconducteurs:
 - NbTi température de transition 10K utilisé à 1.9K \Rightarrow champs de 8.33T
 - Bobinage
 - 1 câble (\varnothing 1.5cm) = 36 brins torsadés (\varnothing 15mm)
 - 1 brin = 6400 filaments (\varnothing 7 μ m)
 - 7600km de câbles = en brins 5 AR Terre-Soleil plus quelques AR Terre-Lune !
 - Cryogénie:
 - Le plus gros frigo du monde: 40000t de matériel à 1.9K (120t d'He superfluide)
 - Un des endroits les plus froids de l'univers



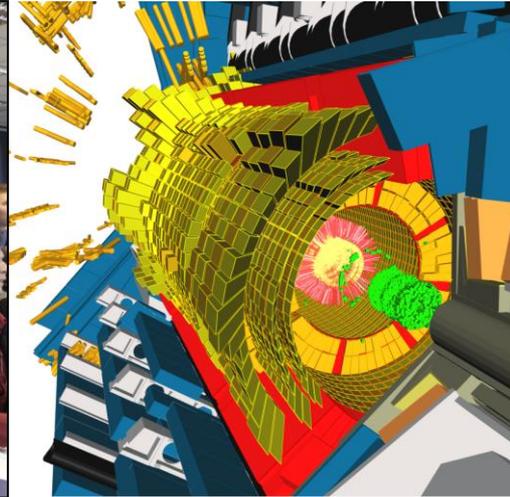
Une machine exceptionnelle : vide & faisceaux

- L'espace le plus vide du système solaire
 - **Ultravide** 10^{-13} atm (10 fois moins que sur la Lune) sur 27 km de circonférence!
- Les faisceaux:
 - **2808 paquets** de $\sim 10^{11}$ protons de quelques cm de long et 1 mm de large sauf aux points de collision alors $16\mu\text{m}$ (1/4 de cheveux humain!), 11245 tours par seconde.
 - **Des trillions de protons, lancés à 99,9999991% de la vitesse de la lumière à « cornaquer »!**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Et ça marche! Très bien même!



- Le 20/11/2009, le faisceau 1 puis le 2 circulent dans le LHC, sans problème depuis l'injection jusqu'à la capture RF. Les 4 détecteurs peuvent enregistrer des données.
- Depuis, montée en énergie et en luminosité : 500 Higgs/manip **10 millions de W/manip/fb-1 en leptons**

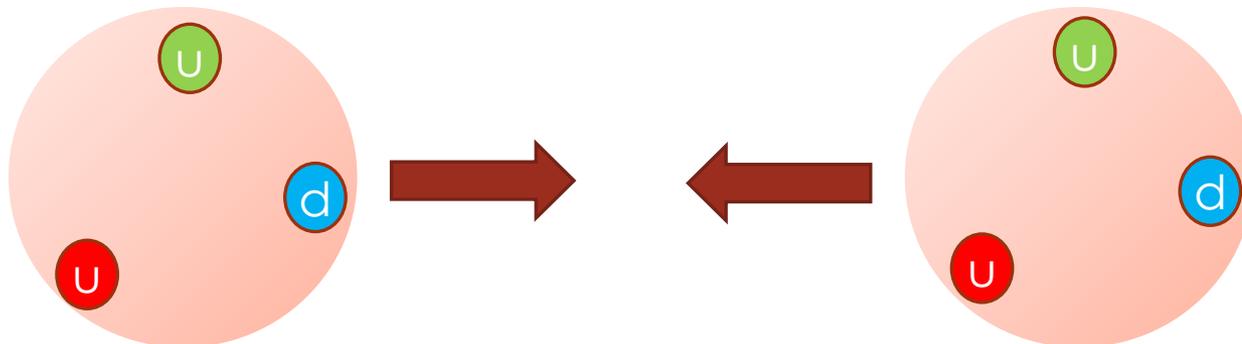


Résumons :

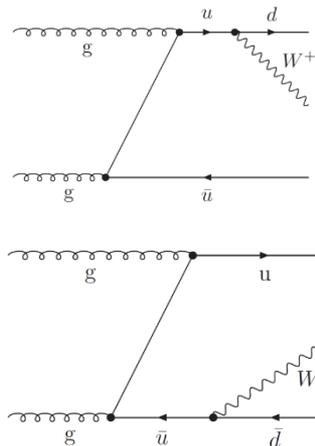
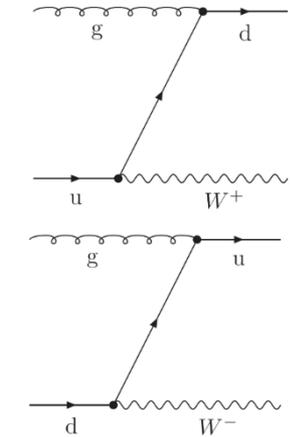
The LHC accelerator

Que fait-on avec toutes ces particules?

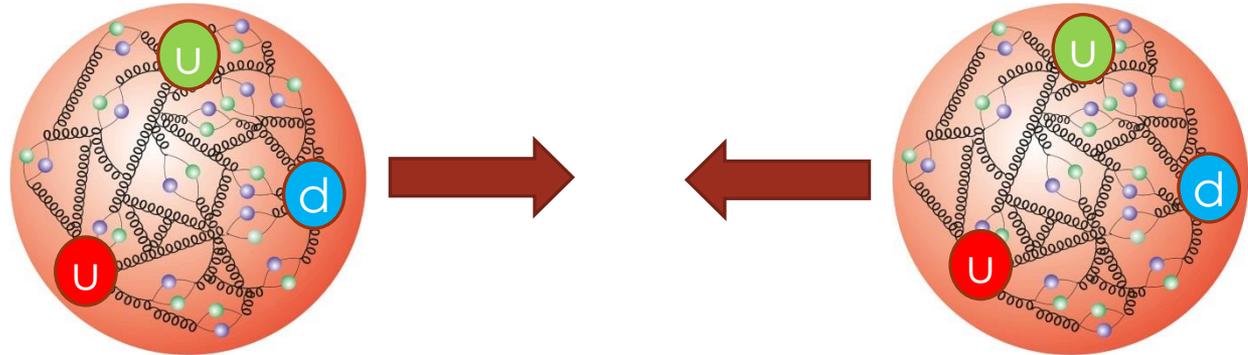
- Concentrons-nous sur les bosons W^+ et W^-
- On a :
 - Gluons de charge 0, quark u de charge $2/3$, quark d de charge $-1/3$
 - $g + u \rightarrow d + W^?$
 - $g + d \rightarrow u + W^?$
 - Sachant que les protons sont composés essentiellement de 2 quarks u et d'un quark d, quel rapport W^+/W^- attend-on ?



Plus compliqué !



Etc...

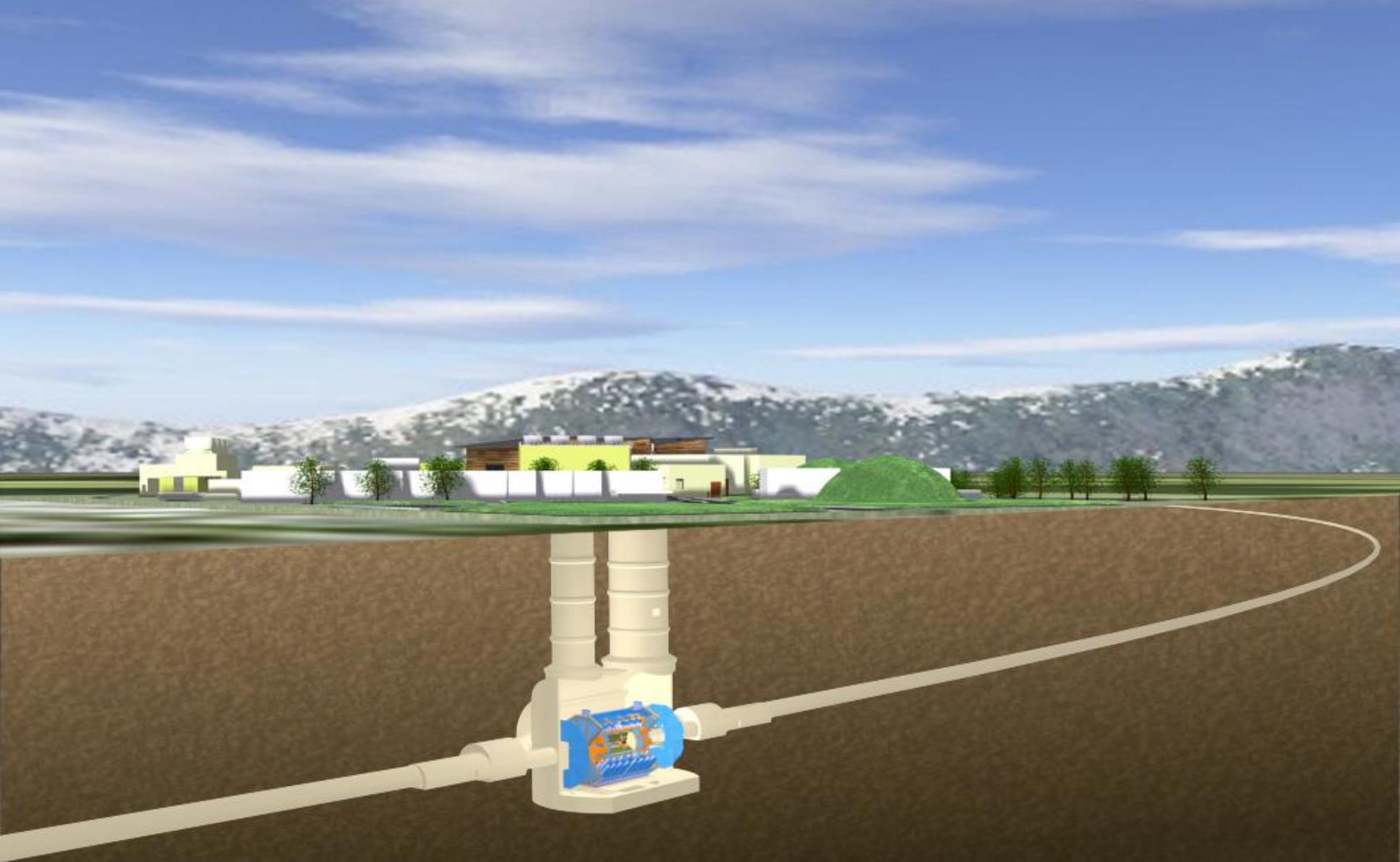


Description du contenu en quarks et gluons des protons :

Grandes incertitudes

On mesure W^+ / W^- , on doit trouver un nombre positif, de l'ordre de 1,5 qui teste le modèle et éventuellement le contraint

Bien sûr pour ça il faut reconnaître les W^+ et les W^- produits...



On a produit des particules : détectons-les!