

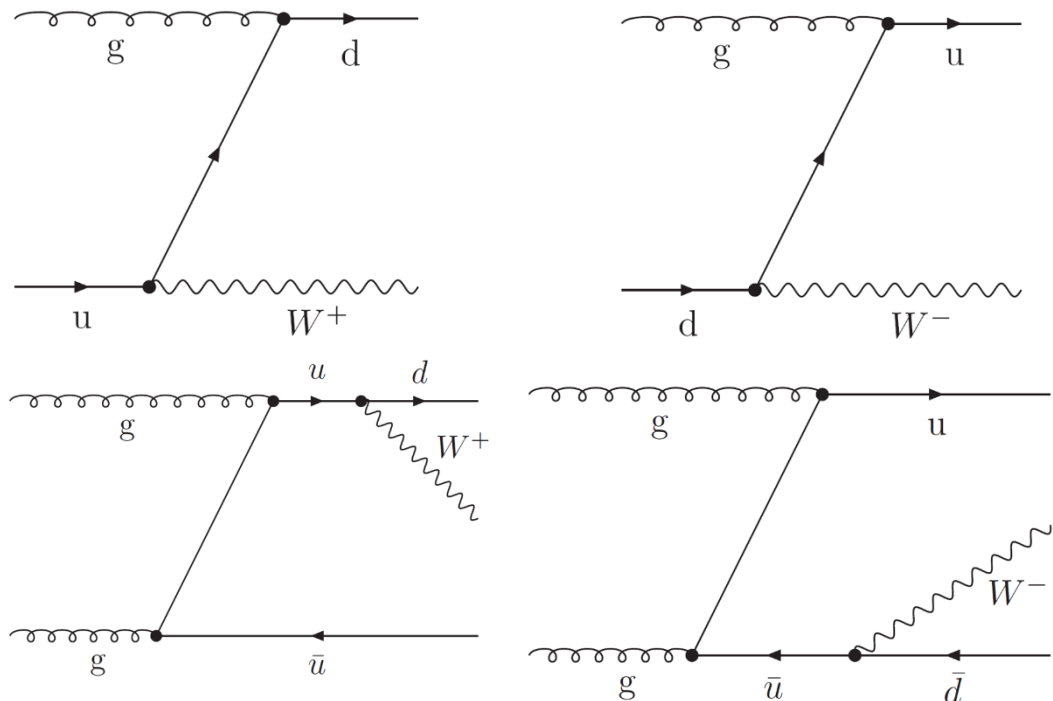


Le LHC au
CERN :
produire des
particules pour
les étudier

Le MODÈLE standard de la physique des particules

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

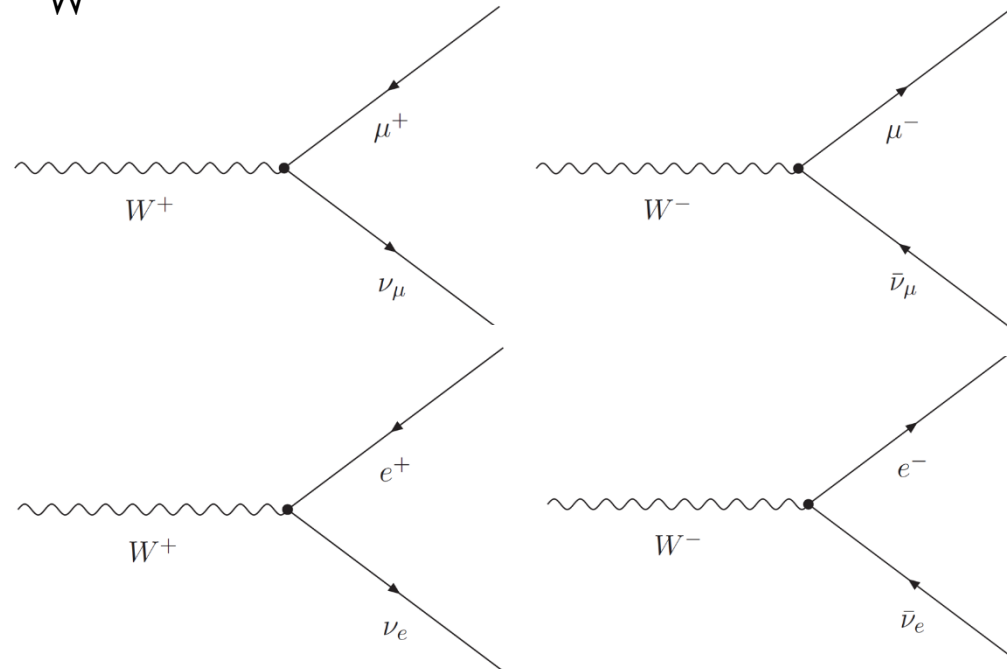
- Modèle = équation mathématique $\Rightarrow$ calculs + confrontation avec les mesures expérimentales = test de notre compréhension
- Par exemple, la production de bosons W^+ et W^-



Le MODÈLE standard de la physique des particules

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

- 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^-



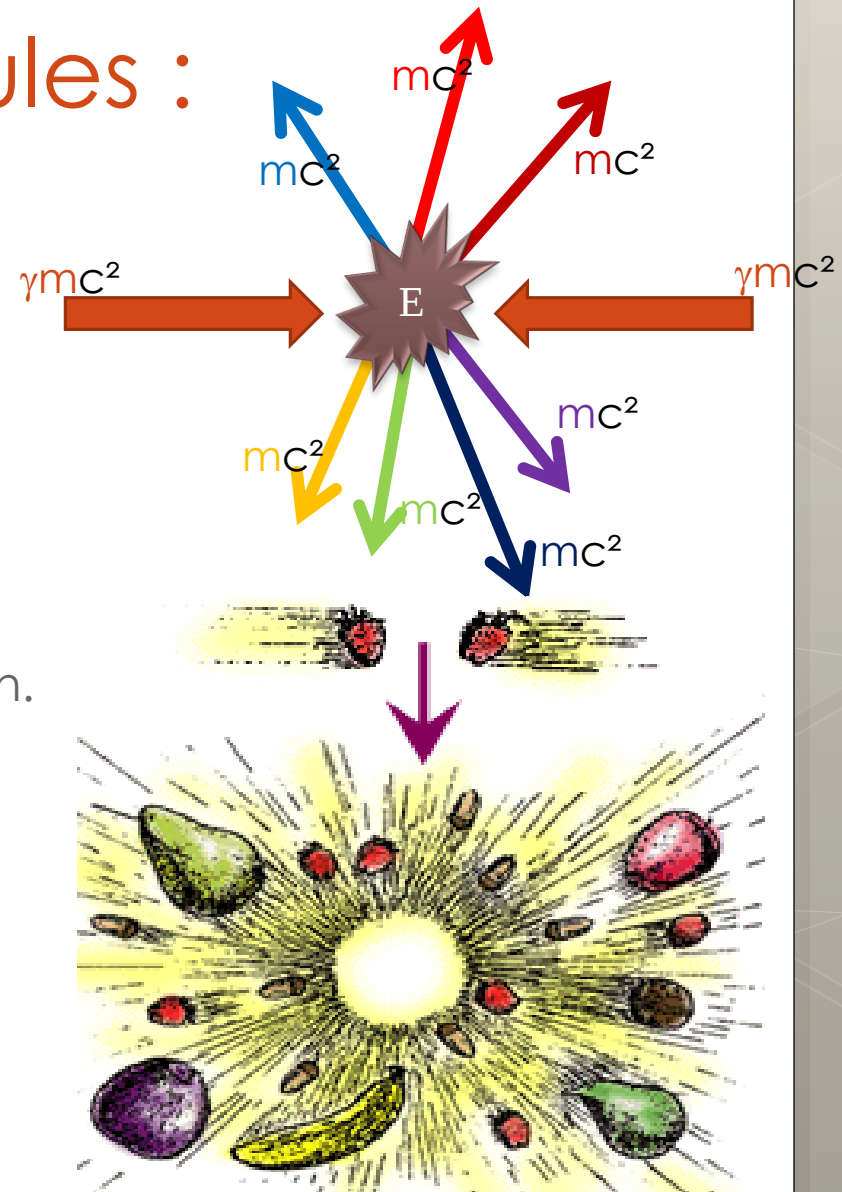
L'outil pour produire des particules : l'accélérateur

- $E=mc^2$: particules $\Leftrightarrow$ énergie.



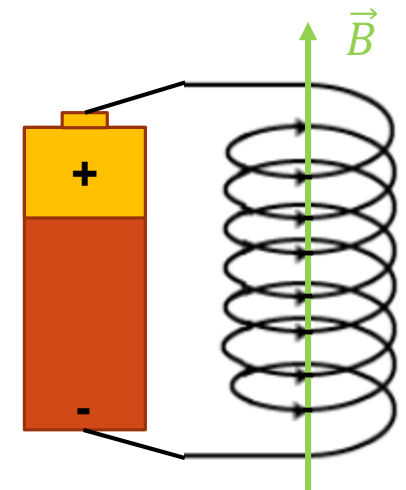
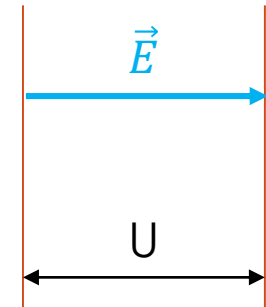
- Energies de **masse** et **cinétique** $\Rightarrow$ accélération.

- Collisions de particules $\Leftrightarrow$ d'autres particules.

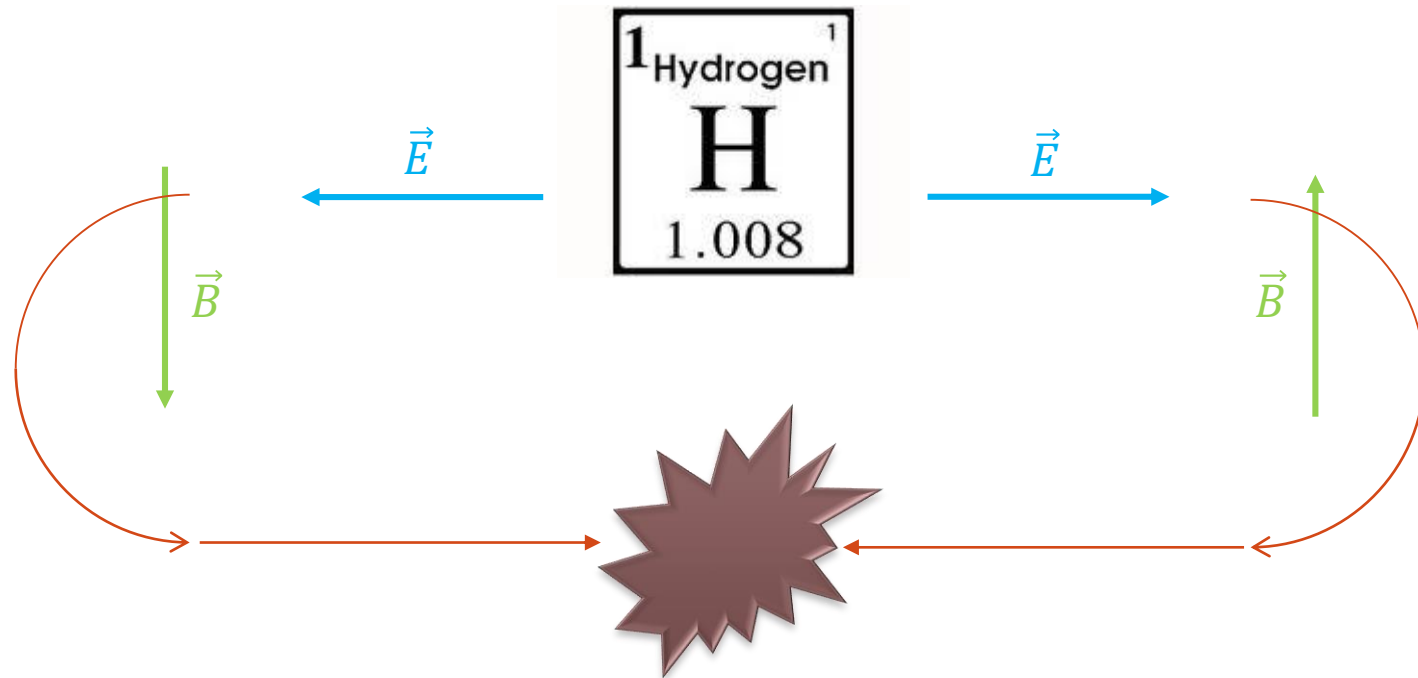


Design d'un collisionneur de particules

- On utilise la **force de Lorentz**.
- Champ **électrique** :
 - Dans un champ électrique $\vec{E}$ les particules chargées, de charge q subissent une force $\vec{F} = q\vec{E}$ et acquièrent une énergie qU où U est la différence de potentiel.
 - Grandes énergies = beaucoup de cavités accélératrices donc on fait tourner les particules dans un **anneau** pour qu'elles passent à chaque tour dans les mêmes cavités.
- Champ **magnétique** :
 - Quand on fait circuler un courant (donc des particules chargées) en boucle on crée un champ magnétique.
 - A l'inverse : quand des particules chargées qui circulent en ligne droite traversent un champ magnétique, leur trajectoire est courbée. On pilote ainsi la trajectoire des particules.
- On accélère des particules faciles à produire ou à récupérer (ex. **proton** i.e. noyau d'hydrogène)



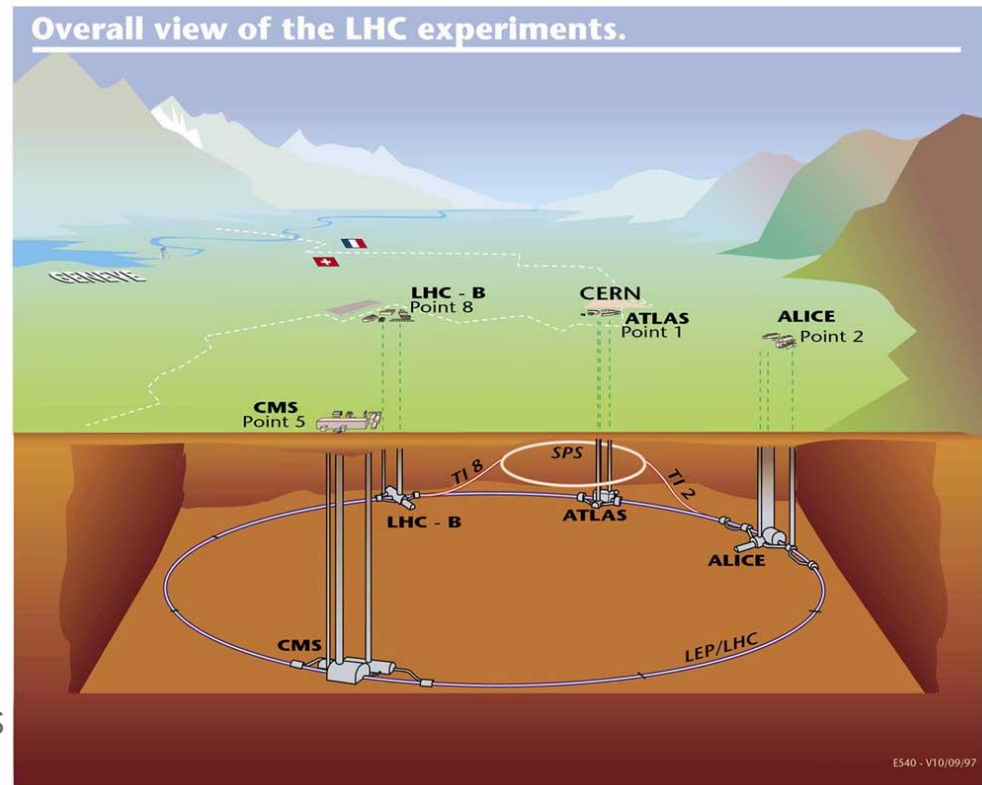
On récapitule



Quels champs ? C'est la physique qui décide.
Et donc les technologies.

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 CERN a 60 ans !

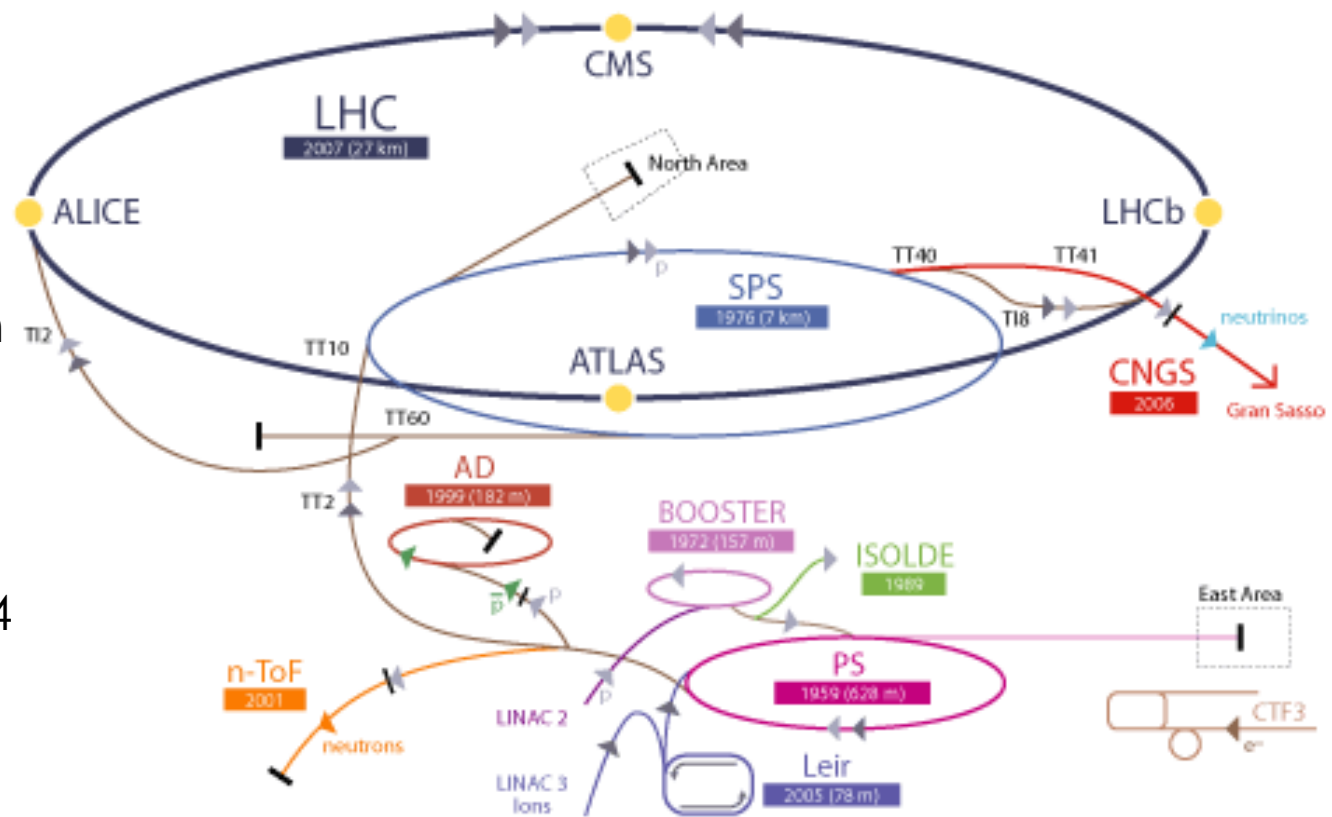
Le complexe d'accélérateurs du CERN

Séquence
d'accélérateurs
de plus en plus
puissants.

Le LHC est le
dernier étage :
de 450 GeV à
plusieurs TeV.

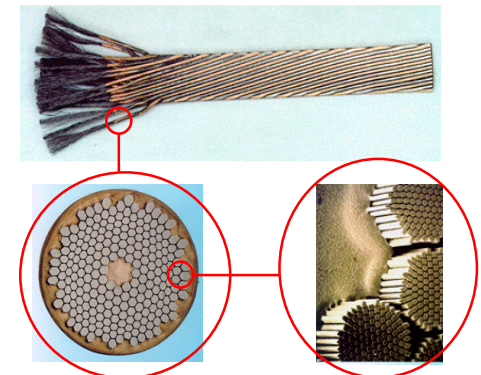
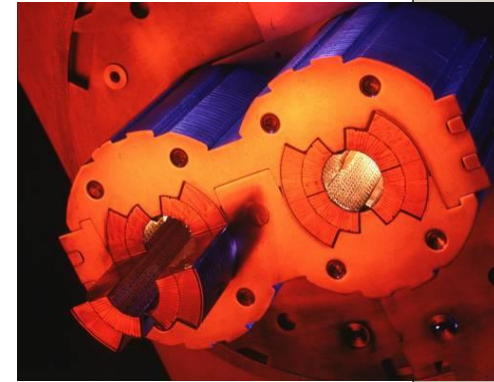
Unité : électron
Volt = eV et
multiples

4 points de
collisions pour 4
grands
détecteurs :
ALICE ATLAS
LHCb et CMS



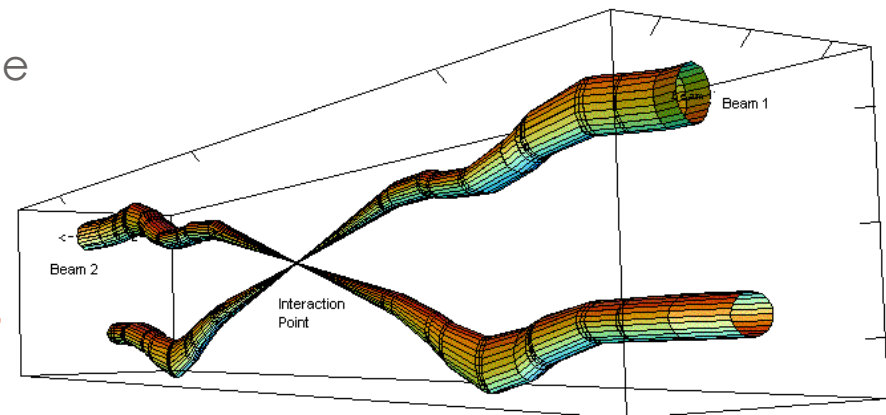
Une machine exceptionnelle : aimants & cryogénie

- 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 (à cause de RI^2) :
 - NbTi température de transition 10K utilisé à 1.9K $\Rightarrow$ champs de 8.33T
 - Bobinage
 - 1 câble ($\varnothing 1.5\text{cm}$) = 36 brins torsadés ($\varnothing 15\text{mm}$)
 - 1 brin = 6400 filaments ($\varnothing 7\mu\text{m}$)
 - 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



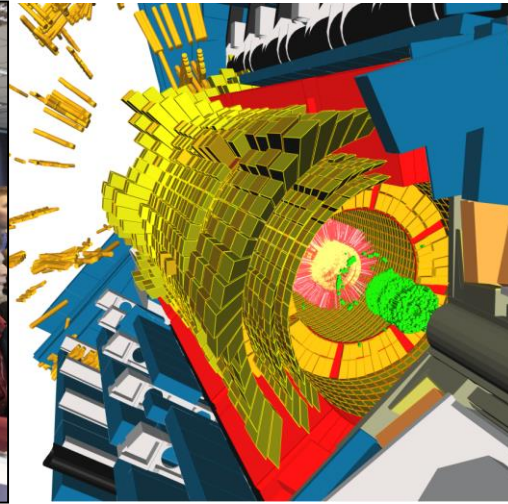
Une machine exceptionnelle : vide & faisceaux

- 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.
 - **Petit calcul : $11245 \times 27 \text{ km} \times 3600 \text{ s}$ > 1 milliard de km en 1 heure!!!!**
 - **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!



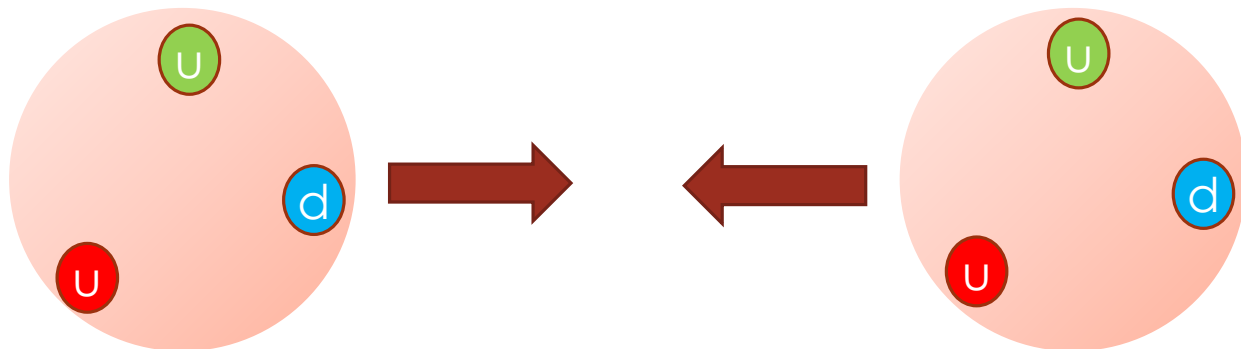
- Le 20/11/2009, le faisceau 1 puis le 2 circulent dans le LHC, sans problème depuis l'injection jusqu'à la capture RF. Les 4 détecteurs peuvent enregistrer des données.
- Depuis, montée en énergie et en luminosité :
 - 500 Higgs/manip
 - **250 millions de W/manip en électron et autant en muon**

Résumons :

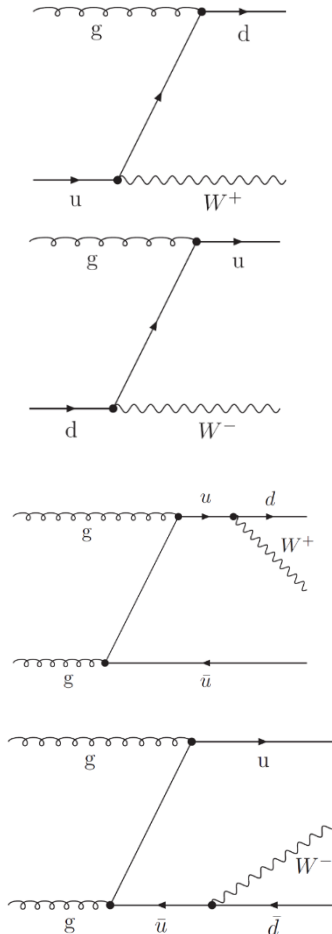
The LHC accelerator

Que fait-on avec toutes ces particules?

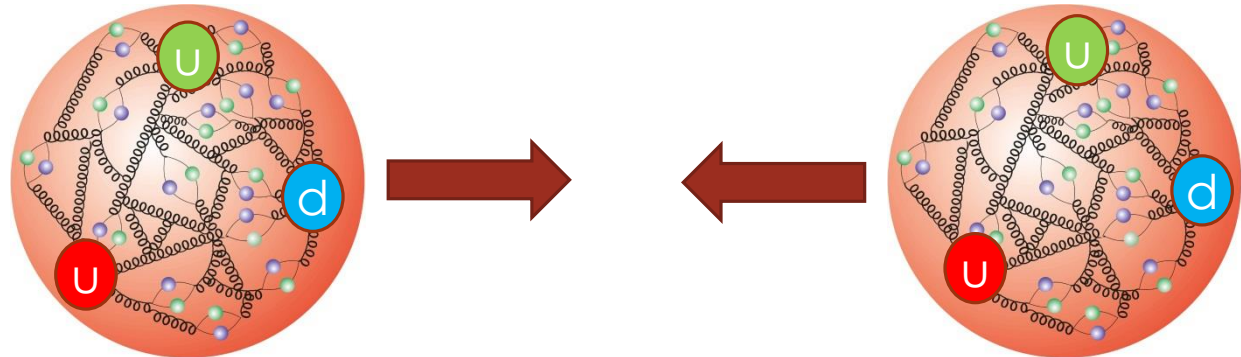
- Concentrons-nous sur les bosons W^+ et W^-
- On a :
 - Gluons de charge 0, quark u de charge $2/3$, quark d de charge $-1/3$
 - $g + u \rightarrow d + W^?$
 - $g + d \rightarrow u + W^?$
 - Sachant que les protons sont composés essentiellement de 2 quarks u et d'un quark d, quel rapport W^+/W^- attend-on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



○ 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!