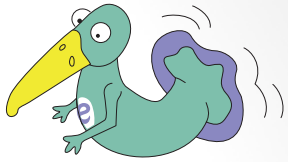
Un zoo particulier

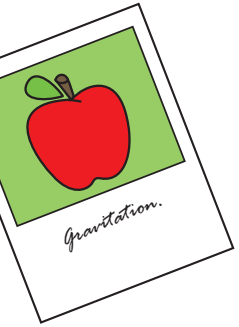
François Arleo, Laboratoire Leprince-Ringuet

(illustrations par Roxane Arleo)

CERN Masterclass – 21 mars 2019

La physique des particules

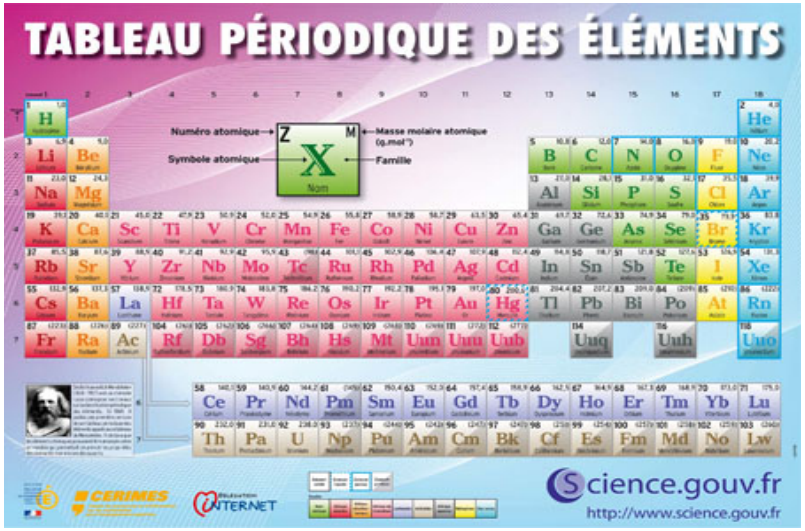


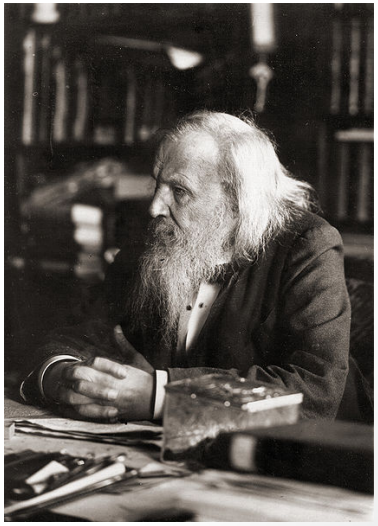


- Son but, comprendre
  - quelles sont les particules élémentaires constituant la matière ?
  - quelles sont les grandes familles de particules ?
  - quelles sont les lois qui les régissent, leurs interactions ?
- … à travers un vaste programme expérimental et théorique !
- En France, une vingtaine de laboratoires et trois institutions
  - CNRS – Institut national de la physique nucléaire et de la physique des particules (IN2P3)
  - Universités
  - Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

Les atomes

- Concept introduit par les Grecs dans l'Antiquité (Démocrite)
- Éléments chimiques qui composent les molécules et cristaux
- Plus d'une centaine d'éléments, classifiés dans le célèbre tableau périodique de Mendeleïev
- Recherche actuelle pour former de nouveaux éléments très lourds

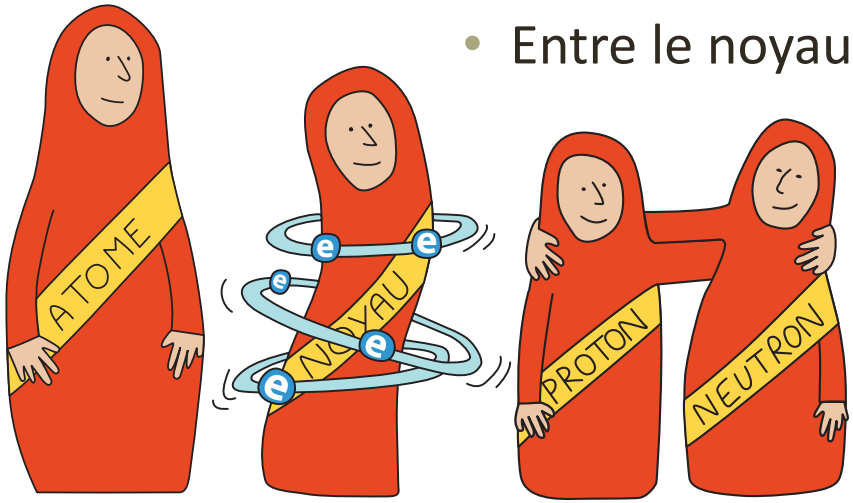




Au cœur de l'atome, les noyaux

Démocrite avait tort : les atomes sont eux-mêmes composés de particules subatomiques ! (expérience de Rutherford, 1909)

- Le noyau atomique
  - contient presque toute la masse de l'atome
  - cent mille fois plus petit que l'atome
  - composé de particules plus petites : les protons et les neutrons
- Les électrons
  - particules élémentaires, deux mille fois plus légères que le proton
  - circulent autour du noyau pour former un « nuage électronique »
- Entre le noyau et les électrons : le vide



… ?

Dans le proton, les « quarks »

Les « quarks » sont les particules élémentaires qui composent les protons et les neutrons

- Existent en 6 modèles différents : les saveurs
  - Le up et le down, l'étrange et le charme, la beauté et le top

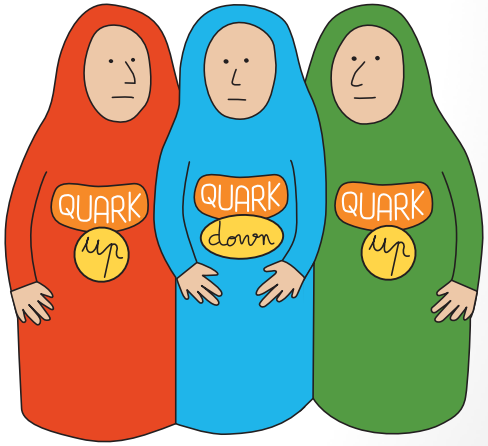
Dans le proton, les « quarks »

Les « quarks » sont les particules élémentaires qui composent les protons et les neutrons

- Existent en 6 modèles différents : les saveurs
  - Le up et le down, l'étrange et le charme, la beauté et le top
- Protons et neutrons composés de 3 quarks, « up » et « down »

proton = quarks u u d

neutron = quarks u d d



- Imaginés par le théoricien Gell-Mann en 1964
- Observés (indirectement) expérimentalement quelques années plus tard

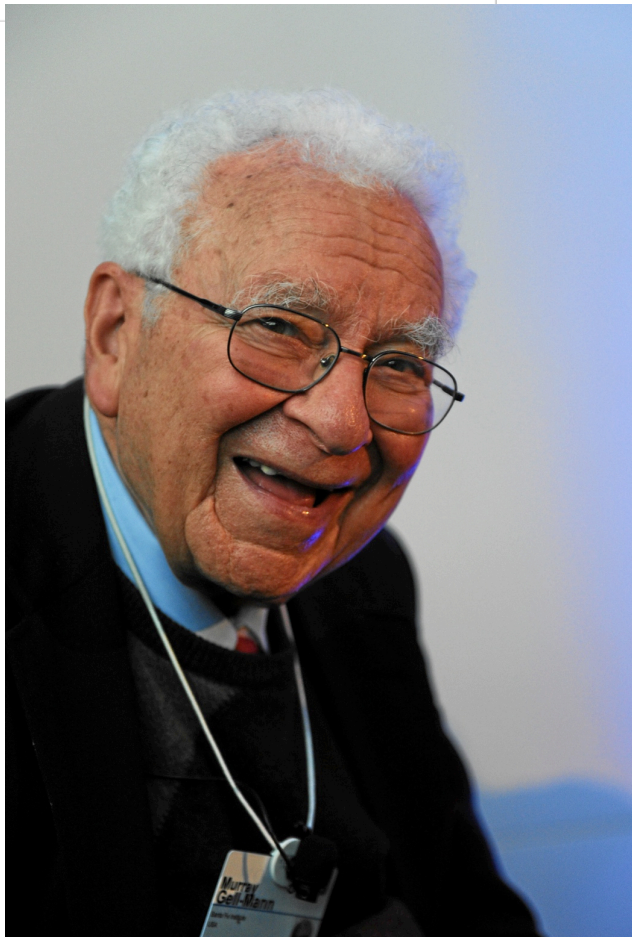
Volume 8, number 3 PHYSICS LETTERS 1 February 1964

A SCHEMATIC MODEL OF BARYONS AND MESONS *

M. GELL-MANN
California Institute of Technology, Pasadena, California

Received 4 January 1964

A simpler and more elegant scheme can be constructed if we allow non-integral values for the charges. We can dispense entirely with the basic baryon b if we assign to the triplet t the following properties: spin $\frac{1}{2}$, $z = -\frac{1}{3}$, and baryon number $\frac{1}{3}$. We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" [6] q and the members of the anti-triplet as anti-quarks $\bar{q}$. Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq), $(qqqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

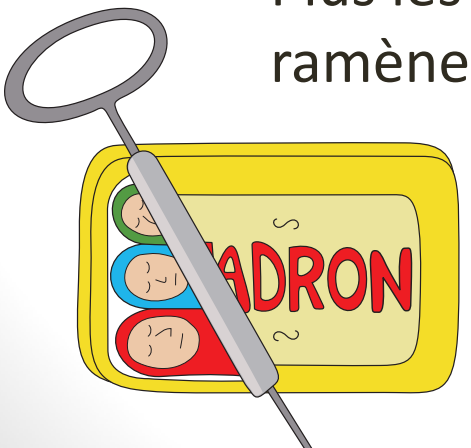


Le mystère du confinement

Jamais un quark n'a été observé de manière isolée

Les quarks s'associent systématiquement

- par trois (quark-quark-quark) pour former des « baryons »
  - proton, neutron, …
- par deux (quark et « antiquark ») pour former des « mésons »
  - pion, kaon, …



Plus les quarks sont séparés, plus la force qui les ramène ensemble est importante, comme un ressort

Le confinement !

Vive le quark libre !

Un millionième de seconde après le Big Bang, la température avoisinait les deux mille milliards de degrés

Pas de confinement à ces températures !

L'Univers était composé d'une « soupe » de quarks et gluons libres

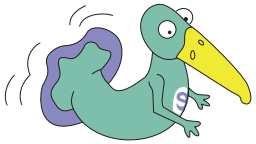
← *Plasma quarks-gluons*

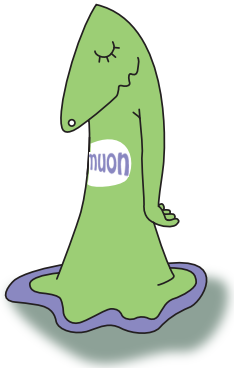
(attention : chaud)

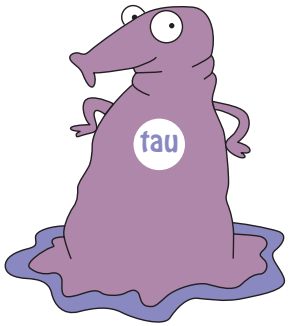
Un peu de légèreté : les leptons !

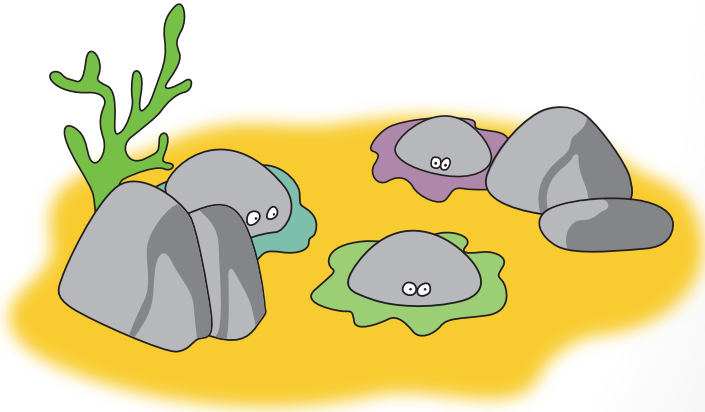
Une autre famille de particules élémentaires compose la matière : les leptons !

- l'électron et deux grands frères : le muon et le tau
- 3 types de neutrinos, particules timides et très légères







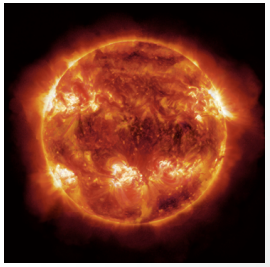


Les particules élémentaires qui composent la matière appartiennent à deux grandes familles : quarks et leptons

Des particules en interaction

Quarks et leptons interagissent selon quatre types d'interaction :

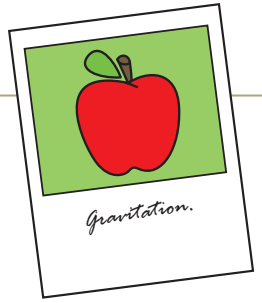
- La gravitation, responsable de la chute d'une pomme sur la tête d'Isaac Newton
- L'interaction électromagnétique, qui agit sur les particules chargées. Elle régit les phénomènes électriques (foudre) et magnétiques (boussoles)
- L'interaction faible, responsable de certains processus radioactifs
- L'interaction forte soude les quarks à l'intérieur des protons et des neutrons, mais n'agit pas sur les leptons !

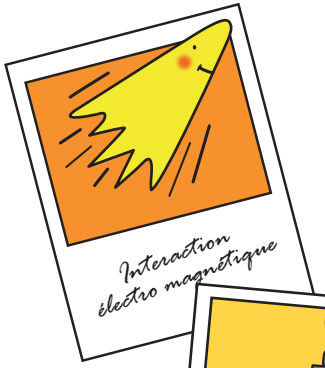


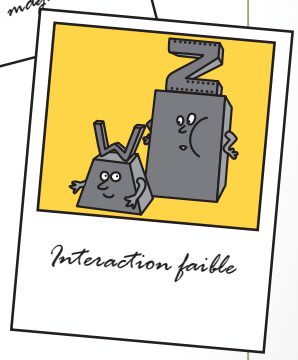
Sous les interactions, les bosons

À chaque interaction fondamentale correspond un (ou plusieurs) « boson »

- La gravitation : le graviton
  - particule hypothétique
- L'interaction électromagnétique : le photon
  - « grain » de lumière, sans masse
- L'interaction faible : les bosons W^+, W^- et Z^0
  - découverts au CERN, prix Nobel 1984
- L'interaction forte : 8 gluons
  - mis en évidence en 1979







Plan du zoo

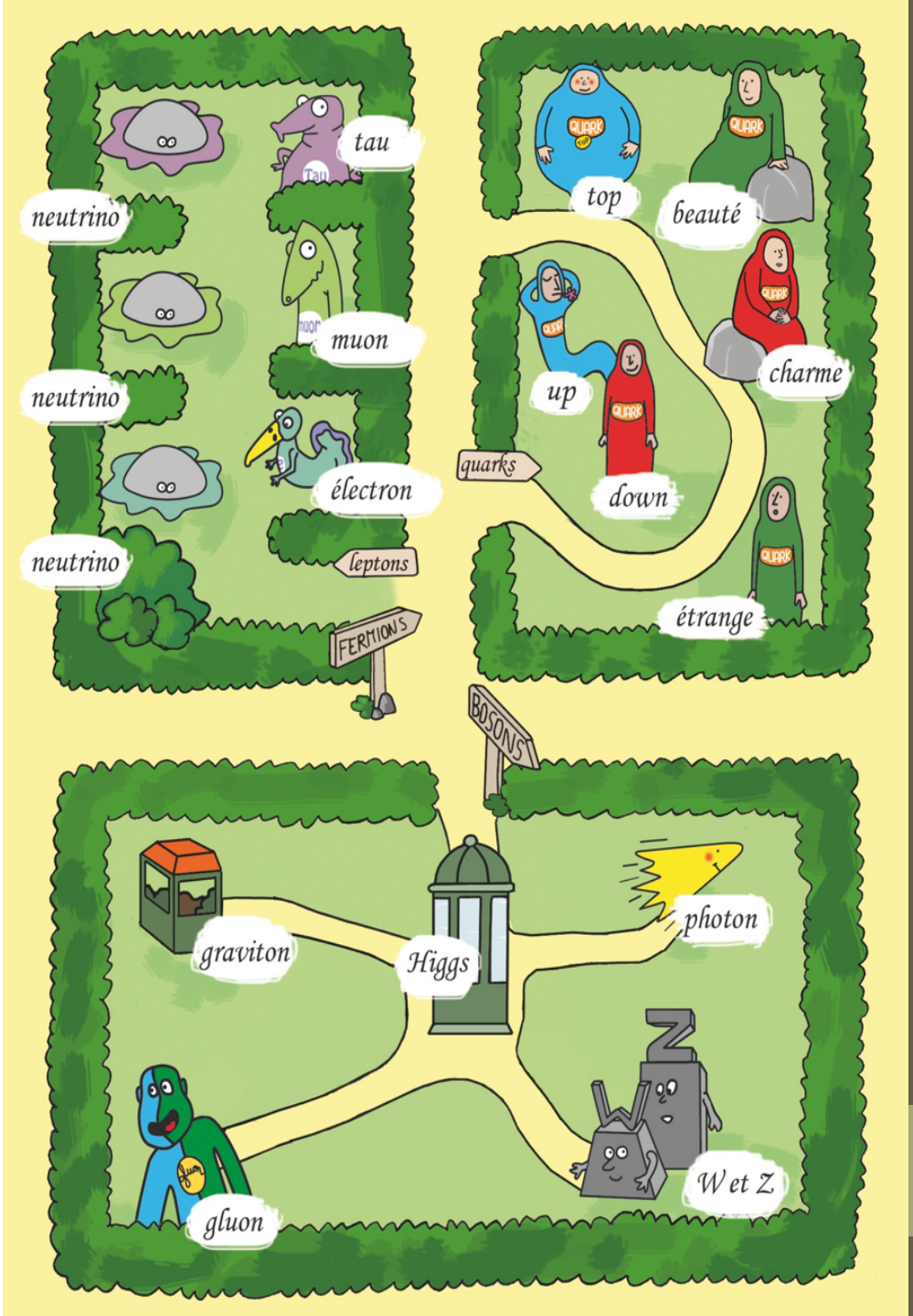
« Le Modèle Standard »

Glashow, Salam, Weinberg
Prix Nobel 1979

Testé avec succès dans de nombreuses expériences !

… mais quelques « problèmes » :

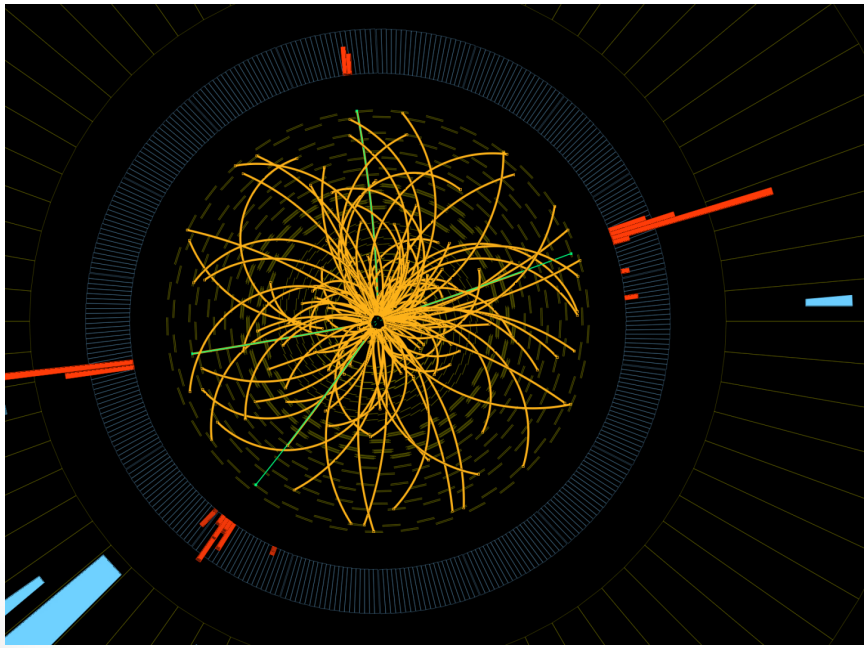
- Matière noire de l'Univers ?
- La gravité fait bande à part
- ~~Un absent : le boson de Higgs~~

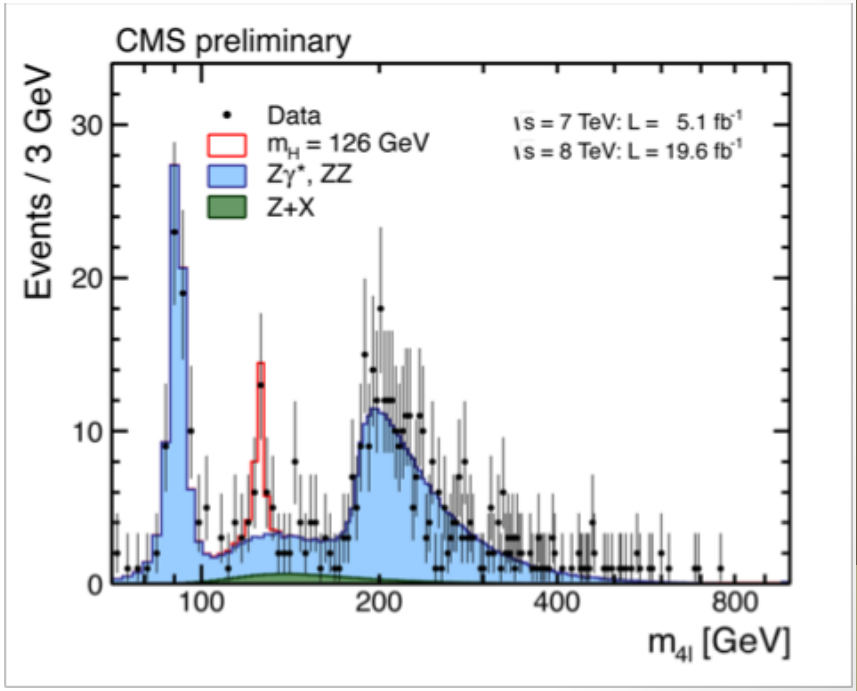


Le boson de monsieur Higgs

(et aussi de messieurs Brout et Englert)

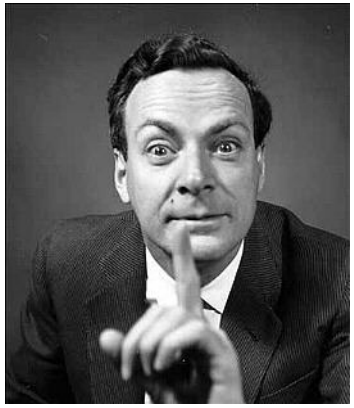
- LE responsable de la masse des particules élémentaires
- Découverte annoncée par les expériences ATLAS et CMS le 4 juillet 2012
- Prix Nobel de Physique 2013 attribué à François Englert et Peter Higgs

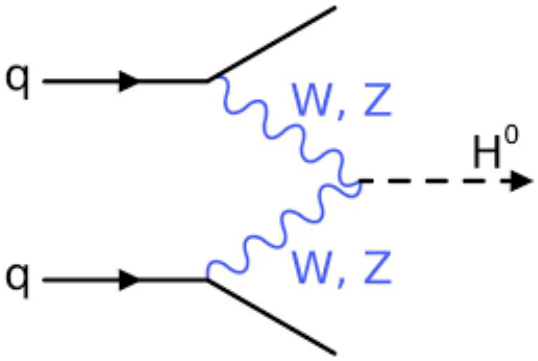


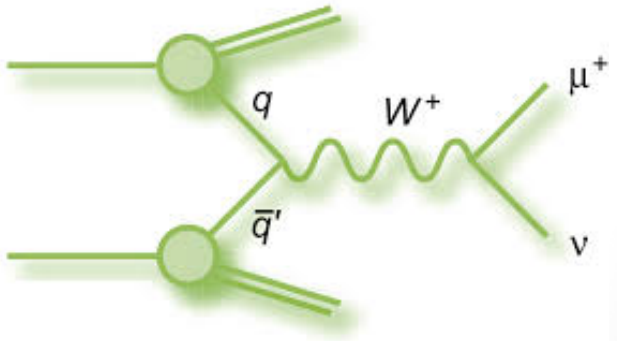


Succès du Modèle Standard

- Le modèle standard permet de prédire avec une grande précision l'abondance des particules produites dans les collisions du LHC
- Les physiciens théoriciens dessinent des « diagrammes de Feynman » leur permettant de calculer les différents processus physiques



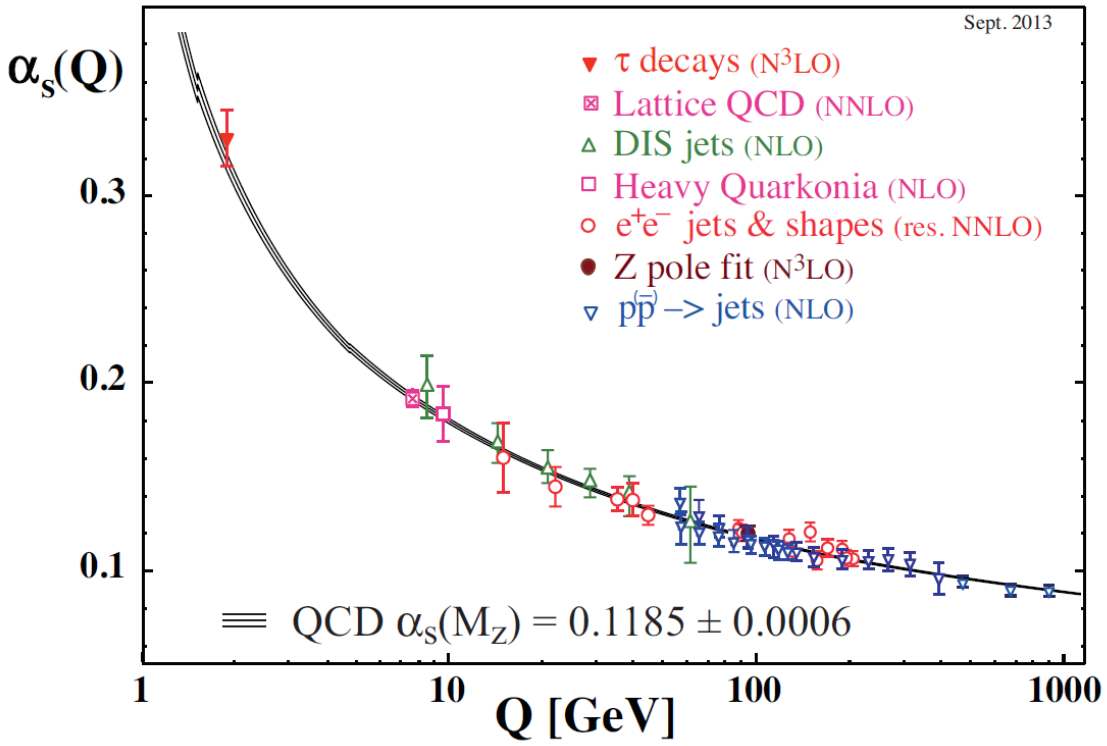


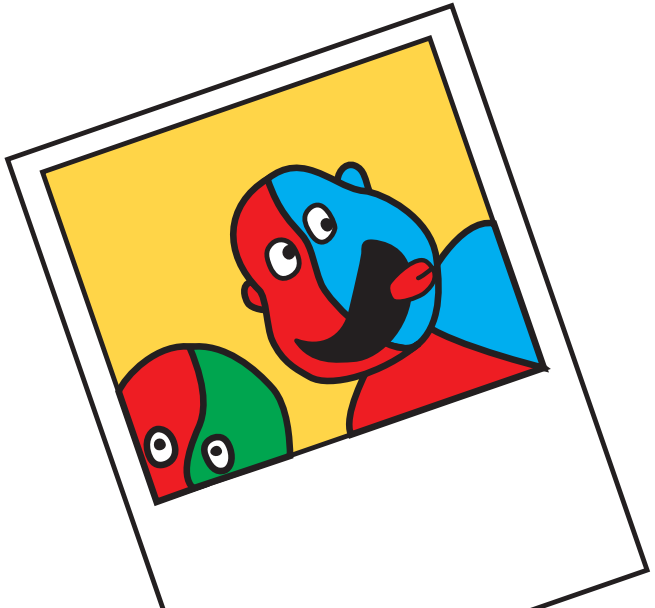


- Un exemple célèbre : l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks !

La liberté asymptotique !

- La théorie prédit que l'intensité de l'interaction forte entre deux quarks diminue quand les quarks se rapprochent. C'est la liberté asymptotique !
- Cette prédiction est vérifiée précisément dans les expériences
- Prix Nobel 2004 pour Gross, Politzer et Wilczek



Et maintenant,...
à vous de jouer :)

Merci pour votre attention !